



Jenni Aaltonen

Ammattikeittiön ilmanvaihtojärjestelmän energiatehokkuuden optimointi

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 14.8.2017

Valvoja: Professori Risto Kosonen

Ohjaaja: Diplomi-insinööri Pertti Ihalainen

Tekijä Jenni Aaltonen

Työn nimi Ammattikeittiön ilmanvaihtojärjestelmän energiatehokkuuden optimointi

Koulutusohjelma Energia- ja LVI-tekniikka

Pää-/sivuaine LVI-tekniikka

Koodi K3008

Työn valvoja Professori Risto Kosonen

Työn ohjaaja Diplomi-insinööri Pertti Ihalainen

Päivämäärä 14.8.2017

Sivumäärä 67 + 4

Kieli Suomi

Tiivistelmä

Suomessa toimii noin 22 000 ammattikeittiötä, jotka kuluttavat vuodessa noin 2,4 TWh sähköä ja lämpöä. Tästä suurin osa kuluu tilojen lämmitykseen sekä ilmanvaihtoon. Ilmanvaihdon tarve ammattikeittiöissä on erilainen kuin muualla rakennuksessa, sillä keittiöissä ilmanvaihdon päätehtävä on poistaa oleskeluvyöhykkeeltä keittiöprosesseissa syntyvä lämpö ja kosteus sekä terveydelle vaaralliset epäpuhtaudet ja käryt. Ammattikeittiössä työskentelyolosuhteet ovat usein haastavat, mikä korostaa sisäilmaston ja hyvän ilmanvaihdon merkitystä. Myös ammattikeittiöissä ilmanvaihdon energiatehokkuutta voidaan parantaa, mutta tämä ei milloinkaan saa aiheuttaa sisäilmaston laatuason heikkenemistä.

Tutkimuksen tavoitteena oli ammattikeittiön ilmanvaihtojärjestelmän energiatehokkuuden optimointi. Tutkimusmenetelmänä käytettiin energiasimulointiin perustuvaa monitavoite-optimointia. Monitavoiteoptimoinnin tavoitteena oli määrittää kustannusoptimaaliset ratkaisut lämmöntalteenoton ja tarpeenmukaisen ilmanvaihdon käytölle osana keittiöilmanvaihtoa. Tutkimuksen kohteena oli kolme esimerkkikeittiötä: koulun valmistuskeittiö, koulun lämmityskeittiö sekä liikenneaseman keittiö.

Optimoinnin minimoitavat kohdefunktiot olivat ilmanvaihtojärjestelmän investointikustannukset sekä vuosittaiset ostoenergiakustannukset. Päättösmuuttujia oli kaksi: lämmöntalteenoton toteutustapa ja ilmanvaihdon ohjaustapa. Päättösmuuttujista muodostui ilmanvaihtojärjestelmälle erilaisia ratkaisuvaihtoehtoja yhteensä 15 (5 x 3) kappaletta. Kukin näistä ratkaisuista mallinnettiin ja simuloitiin IDA ICE -ohjelmistolla, minkä perusteella määritettiin kunkin vaihtoehdon vuosittaiset ostoenergiakustannukset. Näiden tulosten ja investointilaskelmien perusteella määritettiin kolmelle esimerkkikeittiölle investointi- sekä ostoenergiakustannuksiltaan optimaalinen ilmanvaihtojärjestelmä. Monitavoiteoptimoinnin lisäksi ratkaisuvaihtoehtoja vertailtiin myös laskettujen elinkaarikustannusten perusteella.

Lämmöntalteenotto osoittautui taloudellisesti kannattavaksi ratkaisuksi kaikissa tutkimuksen esimerkkikeittiöissä. Tarpeenmukaisen ilmanvaihdon, eli Halton M.A.R.V.E.L. -järjestelmän, osoitettiin olevan taloudellisesti kannattava liikenneaseman keittiössä. Koulujen keittiöissä optimaaliseksi ilmanvaihdon ohjausratkaisuksi osoittautui muuttuvailmavirtajärjestelmä, jossa ilmavirtoja säädetään ajastetusti ja portaittain huuvaryhmäkohtaisilla sulkupelleillä. Vuorokauden ympäri avoinna olevassa liikenneaseman keittiössä ilmanvaihtomäärät ovat selvästi koulujen keittiöitä suuremmat, mistä syystä myös kalliimmat investoinnit energiatehokkuuteen osoittautuivat kannattavammiksi.

Avainsanat keittiöilmanvaihto, optimointi, energiasimulointi, elinkaarikustannukset, lämmöntalteenotto, tarpeenmukainen ilmanvaihto, energiatehokkuus



Author Jenni Aaltonen

Title of thesis Energy efficiency optimization of ventilation system in commercial kitchen

Degree programme Energy- and HVAC-Technology

Major/minor HVAC-Technology

Code K3008

Thesis supervisor Professor Risto Kosonen

Thesis advisor(s) M.Sc. Pertti Ihalainen

Date 14.8.2017

Number of pages 67 + 4

Language Finnish

Abstract

In Finland, there is approximately 22 000 commercial kitchens where 2.4 TWh of electricity and heat is consumed. The majority of this goes to space heating and ventilation. In commercial kitchens the need for ventilation differs much from other sections of the building. The main function of kitchen ventilation is to remove heat, moisture and hazardous contaminants generated by the cooking process. Working conditions are typically especially demanding which underlines the importance of indoor climate and functional ventilation. Improving energy efficiency is possible also in commercial kitchens but it should never be done at the expense of quality of indoor climate.

The objective of this study was to optimize the energy efficiency of ventilation in commercial kitchens. The research method was the simulation-based multi-objective optimization. The objective of the analysis was to determine the cost-optimal solutions for using heat recovery and demand-controlled ventilation as the part of kitchen ventilation. Three different commercial kitchens were selected to the study: school's manufacturing kitchen, school's heating kitchen and service station's kitchen.

The objective of the optimization was to minimize two objective functions: investment costs and annual delivered energy costs of the ventilation system. Decision variables were execution of heat recovery and execution of ventilation control. These decision variables formed 15 (5 x 3) different decision alternatives. Each of these alternatives were modelled and simulated with IDA ICE -software and simulation results were used to calculate annual energy costs. On the grounds of these results and investment calculations the cost-optimal ventilation system was determined to three studied kitchens. In addition to multi-objective optimization, decision alternatives were also compared by calculated life-cycle costs.

Heat recovery proved to be economic solution in every studied kitchen. The results also indicated that demand-controlled ventilation, in this case Halton M.A.R.V.E.L. -system, is cost-optimal solution in service station's kitchen. In schools' kitchens the cost optimal ventilation control system proved to be variable airflow system where air volumes of the multiple exhaust hoods are controlled time scheduled with common flow damper. Service station's kitchen is open round the clock and its air volumes are much bigger than in schools' kitchens. This is why also more expensive investments proved to be more cost-effective in service station's kitchen.

Keywords kitchen ventilation, optimization, energy simulation, life-cycle cost, heat recovery, demand-controlled ventilation, energy efficiency

Alkusanat

Diplomityöni toimeksiantaja on Granlund Lahti Oy. Haluan kiittää työni ohjaajaa Pertti Ihalaista, jonka toimeksiannon ja tuen ansiosta diplomityöni eteni ja valmistui ajallaan. Lisäksi haluan kiittää työkavereitani, jotka ovat kärsivällisesti jaksaneet neuvoa ja auttaa minua työn edetessä.

Työn valvojana toimi professori Risto Kosonen, jonka ehdotuksesta idea työn aiheeksi syntyi. Suurkiitos Ristolle kaikesta työn aikana saamastani avusta ja erityisesti perehdytyksestä työn aiheeseen.

Lisäksi haluan kiittää laitevalmistajien edustajia, joilta olen saanut tutkimukseeni tärkeitä tietoja heidän järjestelmistään ja näiden hinnoista. Erityiskiitos Retermia Oy:n Markus Castrénille, jolta olen saanut laite- ja hintatietojen lisäksi neuvoja myös työn tekemiseen.

Haluan kiittää myös Equa Simulation Ab:n Mika Vuolletta ja Erkki Karjalaista tutkimuksessani tarvittavan ohjelman käyttöoikeudesta ja teknisestä tuesta. Erityiskiitos myös Granlund Consulting Oy:n Markus Nisulalle, joka opasti minua ohjelmiston käytössä sekä perehdytti työn tutkimusmenetelmään.

Lopuksi haluan kiittää perhettäni ja ystäviäni, joiden tuella ja kannustuksella olen saatanut opintoni ja diplomityöni kunnialla loppuun.

Espoo 14.8.2017

Jenni Aaltonen

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Alkusanat

Sisällysluettelo

Merkinnät ja lyhenteet

Sisällysluettelo

Merkinnät ja lyhenteet

1	Johdanto	1
1.1	Tutkimuksen tausta.....	1
1.2	Tutkimusongelma ja työn tavoite	2
1.3	Työn rakenne	3
2	Ammattikeittiöiden ilmanvaihto	4
2.1	Taustaa.....	4
2.1.1	Ammattikeittiöt Suomessa	4
2.1.2	Ammattikeittiötyypit	4
2.1.3	Ammattikeittiöiden sisäilmasto-ongelmat ja ilmanvaihdon tehtävät	5
2.2	Keittiöilmanvaihtoa koskevat määräykset ja ohjeet	6
2.2.1	Suomen rakentamismääräyskokoelma	6
2.2.2	Ammattikeittiöiden sisäilmastoluokittelu	7
2.2.3	EU-säädökset ja ekosuunnittelu	9
2.3	Ammattikeittiöiden ilmanvaihtoratkaisut ja energiatehokas suunnittelu	10
2.3.1	Yleistä	10
2.3.2	Poistoilmaratkaisut ja -laitteet.....	10
2.3.3	Ilmanjakoratkaisut ja -laitteet.....	12
2.3.4	Lämpötilojen hallinta	13
2.3.5	Rasvanerotus	14
2.3.6	Ilmanvaihdon energiatehokas mitoitus ammattikeittiöön	16
2.3.7	Lämmöntalteenotto	18
2.3.8	Tarpeenmukainen ilmanvaihto	20
3	Tutkimuksen kohdekeittiöt	24
3.1	Keittiöiden esittely	24
3.2	Keittiö 1. Koulun valmistuskeittiö	24
3.2.1	Tietoja keittiöstä ja sen käytöstä	24
3.2.2	Keittiön laiteluettelo ja ilmapuhtauslaskelmat	25
3.2.3	Keittiön lämpö- ja kosteusolosuhteet	26
3.3	Keittiö 2. Koulun lämmityskeittiö	27
3.3.1	Tietoja keittiöstä ja sen käytöstä	27
3.3.2	Keittiön laiteluettelo ja ilmapuhtauslaskelmat	29
3.3.3	Keittiön lämpö- ja kosteusolosuhteet	29
3.4	Keittiö 3. Liikenneaseman keittiö	30
3.4.1	Tietoja keittiöstä ja sen käytöstä	30
3.4.2	Keittiön laiteluettelo ja ilmapuhtauslaskelmat	32
3.4.3	Keittiön lämpö- ja kosteusolosuhteet	32
4	Energiasimulointiin perustuva monitavoiteoptimointi.....	34
4.1	Tutkimusmenetelmä ja tutkimuksen tavoite.....	34
4.2	Monitavoiteoptimointi	34
4.3	Simuloinnin ja optimoinnin yhdistäminen	36

4.4	Tutkimuksen optimointiongelman rajausta.....	37
5	Keittiön ilmanvaihtojärjestelmän investointilaskelmat.....	39
5.1	Tutkimuksen investointilaskelmien metodiikka.....	39
5.2	Tutkimuksen ilmanvaihtojärjestelmän investointi- ja elinkaarilaskelmat.....	41
5.2.1	Investointikustannukset.....	41
5.2.2	Huoltokustannukset.....	43
5.2.3	Laskentakorot ja diskonttaustekijät.....	45
5.2.4	Energian hinnat	45
6	Keittiöiden ilmanvaihtojärjestelmän energiasimulointi	47
6.1	Menetelmä	47
6.2	Lämpökuormat	47
6.3	Ilmanvaihtojärjestelmän mallinnus	48
7	Ammattikeittiöiden kustannusoptimaaliset ilmanvaihtoratkaisut.....	53
7.1	Optimoinnin tulokset.....	53
7.1.1	Tulosten määrittely.....	53
7.1.2	Keittiö 1. Koulun valmistuskeittiö	53
7.1.3	Keittiö 2. Koulun lämmityskeittiö.....	55
7.1.4	Keittiö 3. Liikenneaseman keittiö	56
7.2	Herkkyystarkastelu: eskalaation vaikutus järjestelmän elinkaarikustannuksiin 58	
7.3	Johtopäätöksiä	60
8	Yhteenveto	63
	Lähdeluettelo.....	65
	Liitteet	

Merkinnät ja lyhenteet

a_n		jaksollisten suoritusten diskonttaustekijä
$a_{y,k}$		yksittäisen suorituksen diskonttaustekijä
D_h	[m]	keittiölaitteen hydraulinen halkaisija
F_k		pääoman arvo vuoden k lopussa
$F(x)$		optimoinnin kohdefunktiot
f		inflaation vaikutusta kuvaava korkotekijä
f_e		energian hinnan inflaatio eli eskalaatio
G_i		optimoinnin yhtälörajoitteet
H_i		optimoinnin epäyhtälörajoitteet
I_0		alkuinvestointi ensimmäisen vuoden alussa
i		nimelliskorko tai valittu laskentakorko
K_{ads}		huuvan mitoitusilmavirran laskemisessa käytetty kerroin, joka huomioi yleisilmanvaihdon tehokkuuden
K_k		vuoden k kulut
k		huuvan mitoitusilmavirran laskemisessa käytetty kokeellinen kerroin
L	[m]	keittiölaitteen leveys
LTO		lämmöntalteenotto
MIV		muuttuvailmavirta
n		tarkasteluajanjakson pituus vuosina
P		hankkeen nykyarvo
P_i	[kW]	keittiölaitteen liitäntäteho
q_i	[l/s/kW]	keittiölaittekohtainen mitoituspoistoilmavirta
q_{kp}	[l/s]	huuvan poistoilmavirta
$q_{v,exp}$	[m ³ /s]	VDI 2052 mitoitusstandardin mukaan laskettu huuvan poistoilmavirta, jossa huomioidaan yleisilmanvaihdon tehokkuus
$q_{v,p}$	[m ³ /s]	VDI 2052 mitoitusstandardin mukaan laskettu huuvan poistoilmavirta
r		huuvan poistoilmavirran laskemisessa käytetty kerroin, joka ottaa huomioon keittiöryhmän asennuspaikan

r		reaalikorko investointilaskelmissa
r_e		eskalaation huomioiva reaalikorko
S		jäännösarvo vuoden n lopussa
SFP_{int}	$[kW/(m^3/s)]$	ilmanvaihtokomponenttien sisäinen ominaissähköteho
$S_{y,k}$		yksittäisen suorituksen korkotekijä
T_k		vuoden k tuotot
T_{poisto}	$[K]$	poistoilman lämpötila
T_{tulo}	$[K]$	tuloilman lämpötila
T_{ulko}	$[K]$	ulkoilman lämpötila
VIV		vakioilmavirta
W	$[m]$	keittiölaitteen pituus
x		optimoinnin muuttujavektori
z	$[m]$	poistolaitteen etäisyys keittiölaitteesta
η_{Ttulo}		tuloilman lämpötilahyötysuhde
φ		keittiölaitteiden samanaikaisuuskerroin
ϕ_c	$[W]$	keittiölaitteen konvektiivinen lämpökuorma

1 Johdanto

1.1 Tutkimuksen tausta

Kansainväliset tavoitteet ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi ja kestävä kehityksen edistämiseksi vaikuttavat lainsäädäntöömme ja rakentamiseen myös kansallisella tasolla. Kestävä kehityksen periaatteiden mukaisella rakentamisella, eli kestävällä rakentamisella, on ratkaiseva rooli ilmastonmuutoksen hillinnässä, sillä rakentamiseen ja rakennusten ylläpitoon kuluu noin 40 % Suomen kokonaisenergiankulutuksesta. Merkittävä osa kestävästä rakentamisesta on energiatehokkuuden parantaminen, sillä kasvihuonekaasupäästöjen määrä on vahvasti sidoksissa käytetyn energian määrään. (Sandberg 2014, s. 467.)

Jatkuvasti kiristynvä lainsäädäntö energiatehokkuuden osalta vaatii rakentajia aika ajoin uudistamaan toimintatapojaan ja tehostamaan suunnitteluratkaisujaan. Rakennusten energiatehokkuusdirektiivin mukaan kaikkien uusien rakennusten pitää olla lähes nolla-energiarakennuksia vuoden 2021 alusta lähtien ja uusien julkisten rakennusten jo vuodesta 2019 lähtien. Vaikka ilmanvaihto on periaatteessa pieni osa kestävä rakentamisen kokonaisuutta, on sillä kuitenkin suuri merkitys rakennuksen energiatehokkuuteen ja sisäilmastoon. (Sandberg 2014.)

Myös huoli sisäilmaston laadusta on kasvanut viime vuosina tietoisuuden ja rakennusten sisäilmastoon liittyvien terveysongelmien lisääntyessä. On tiedossa, että rakennuksien sisäilmasto vaikuttaa suuresti siellä oleskelevien ihmisten terveyteen, viihtyisyyteen sekä suorituskykyyn. Ammattikeittiöissä työskentelyolosuhteet ovat usein erityisen haastavat. Keittiölaitteista syntyvät suuret lämpö- ja kosteuskuormat voivat heikentää keittiön lämpöoloja ja aiheuttaa työnteekijöille ylimääräistä kuormitusta. Lisäksi ruuanlaittoprosesseissa syntyy hiukkasmaisia ja kaasumaisia yhdisteitä, jotka ovat tutkitusti terveydelle vahingollisia. Nämä ongelmat korostavat sisäilmaston ja hyvän ilmanvaihdon merkitystä ammattikeittiöissä.

Ilmanvaihdon tarve ammattikeittiöissä on erilainen kuin muualla rakennuksessa. Keittiöiden energiankulutus pinta-alaa kohden on paljon muuta rakennusta suurempi, mikä johtuu osaksi juuri suuresta ilmanvaihtotarpeesta. Keittiöissä ilmanvaihdon tarpeeseen vaikuttavat lähinnä keittiön prosessit ja keittiölaitteet. Keittiöissä vaaditaan suuria poistoilmamääriä, jotta keittiöprosesseissa syntyvä konvektiolämpövirtaus ja samalla ruuanlaitosta aiheutuvat päästöt saataisiin siepattua poistoilmalaitteisiin, eivätkä ne päätyisi oleskeluvyöhykkeelle tai muualle rakennukseen. Ilmanvaihtoa tehostamalla voidaan tarvittavia ilmamääriä pienentää, mutta tätä ei kuitenkaan tule tehdä sisäilmaston laadun kustannuksella.

Keittiöilmanvaihdon tehtävä on siis tarjota tilaan terveelliset, viihtyisät ja tuottavat työskentelyolosuhteet. Samalla ilmanvaihdon kuuluu poistaa keittiöprosesseissa syntyvät hajut, epäpuhtaudet, lämpö ja kosteus. Energiatehokkaan keittiöilmanvaihdon tehtävä on tarjota kaikki tämä, mahdollisimman vähän energiaa ja luonnonvaroja kuluttaen. Keittiöilmanvaihdon energiatehokkuutta voidaan parantaa nykyisistä normeista monin keinoin. Haasteena on kuitenkin ilmanvaihdon energiankulutuksen pienentäminen ja jatkuvasti kiristyvien määräysten noudattaminen niin, että sisäilmaston laadusta ei jouduta tinkimään.

Ammattikeittiöiden ilmanvaihdon suunnittelussa kustannukset ovat usein määräysten ohella ratkaiseva tekijä. Ilmanvaihtojärjestelmän investointikustannukset ja käyttökustannukset ovat kuitenkin yleensä ristiriidassa keskenään. Investointikustannuksiltaan halpa järjestelmä on usein paljon energiaa kuluttava, jolloin käyttökustannukset ja samalla negatiiviset ympäristövaikutukset ovat suuremmat. Energiatehokkaat järjestelmät ovat taas investointeina yleensä kalliimpia. Tätä varten tulisikin tarkastella hankkeen koko elinkaarta, kun halutaan optimoida kustannukset. Tässäkin tarkastelussa tulisi huomioida lisäksi sisäilman laatu, sillä myös työntekijöiden hyvinvointi on kustannustekijä silloin, kun puhutaan tuottavuudesta, sairaspoissaoloista ja työntekijöiden vaihtuvuudesta.

1.2 Tutkimusongelma ja työn tavoite

Ammattikeittiöissä lämmöntalteenotto ja ilmanvaihdon tarpeenmukaistaminen ovat molemmat tehokkaita keinoja parantaa ilmanvaihdon energiantehokkuutta. Ilmanvaihdon varustaminen näillä laitteistoilla nostaa kuitenkin järjestelmän investointikustannuksia. Lisäksi elinkaarikustannuksia tarkastellessa on huomioitava esimerkiksi lämmöntalteenottolaitteiston huolto- ja puhdistustarve sekä lisäpainehäviön aiheuttama lisäys puhallinenergian kulutukseen. Nämä lisäkustannukset ovat kuitenkin yleensä pieniä verrattuna laitteistoilla saavutettavaan energiansäästöhyötyyn. Tarkasteltavan arvoinen asia lisäksi on se, kuinka nämä laitteistot vaikuttavat toisiinsa järjestelmän elinkaarikustannusten kannalta. Tarpeenmukaisella ilmanvaihdolla lämmöntalteenottolaitteistosta saatava hyöty pienenee poistoilmavirtojen pienentyessä.

Tämän diplomityön tutkimusongelma on ammattikeittiön ilmanvaihtojärjestelmän investointikustannusten ja vuositasen ostoenergiakustannusten optimointi. Monitavoiteoptimoinnin tavoitteena on määrittää kustannusoptimaaliset ratkaisut lämmöntalteenoton ja tarpeenmukaisen ilmanvaihdon käytölle osana keittiöilmanvaihtoa. Tutkimuksen tarkoituksena on selvittää, onko erityyppisten ammattikeittiöiden ilmanvaihto kustannustehokkainta varustaa lämmöntalteenotolla, tarpeenmukaisella säädöllä vai molemmilla. Lisäksi optimoinnin tavoitteena on määrittää minkä tyyppinen lämmöntalteenottoalaitteisto kannattaa elinkaarikustannusten kannalta valita. Ilmanvaihtojärjestelmän tulee olla myös teknisesti toimiva ja viranomaismääräysten mukainen.

Keittiön käyttöprofiili vaikuttaa merkittävästi tarpeenmukaisella ilmanvaihdolla saavutettavaan energiansäästöön ja tällä tavoin investoinnin kannattavuuteen. Keittiön käyttöprofiilin ennustaminen on kuitenkin usein hankalaa siinä vaiheessa, kun ilmanvaihtoa suunnitellaan. Tutkimusongelmaa lähestytään työssä esimerkkikeittiöiden avulla. Tutkimuksen kohteeksi on valittu kolme erityyppistä ammattikeittiötä. Nämä ovat jo käytössä olevia keittiöitä, joten niiden käyttöprofiilit ja todelliset annosmäärät on mahdollista selvittää. Näiden keittiöiden sisäiset lämpökuormat sekä ilmanvaihtojärjestelmät mallinnetaan ja vuositasen energiankulutus määritetään simuloimalla. Kullekin näille keittiöille määritetään monitavoiteoptimoinnilla elinkaarikustannuksiltaan optimaalisin ilmanvaihtokokonaisuus.

Elinkaarikustannuksissa otetaan huomioon investointi- ja ostoenergiakustannukset, jotka ovat monitavoiteoptimoinnin minimoitavat kohdefunktiot. Investointikustannuksiin lasketaan vertailun kannalta oleelliset ilmastointijärjestelmän hankinta- ja asennuskustannukset sekä järjestelmän huolto- ja puhdistuskustannukset. Ilmanvaihtojärjestelmän

ostoenergiakustannukset muodostuvat järjestelmän kuluttaman sähköenergian sekä tuoilman lämmitysenergian kulutuksesta.

1.3 Työn rakenne

Tutkimuksen alussa perehdytään lyhyesti ammattikeittiöiden ilmanvaihtoon ja sisäilmastotavoitteisiin. Työssä tutkitaan sitä, mitä erityistavoitteita keittiökäyttö asettaa ilmanvaihtojärjestelmälle, millaisia tavoitteita ja määräyksiä keittiöiden sisäilmastolle on asetettu, millaisia ovat tyypilliset ilmanvaihtoratkaisut ammattikeittiöissä sekä miten ilmanvaihtojärjestelmän energiatehokkuuteen voidaan keittiöissä teknisillä ratkaisuilla vaikuttaa. Lisäksi perehdytään tarkemmin ilmanvaihtojärjestelmiin kuuluvien lämmöntalteenottolaitteistojen toimintaan sekä ilmanvaihdon ohjaamiseen tarpeenmukaisesti.

Seuraavaksi työssä määritellään ja esitellään optimoinnin kohteena olevat ammattikeittiötyypit sekä näiden laitteistot, sisäiset lämpökuormat ja käyttöprofiilit. Keittiöitä on valittu kolme erilaista: koulun valmistuskeittiö, koulun lämmityskeittiö sekä liikenneaseman keittiö. Tutkimuksen kohteena oleville keittiöille esitetään myös ilmavirtojen mitoituslaskelmat. Mitoitusilmavirtoina käytetään keittiöihin todellisuudessa suunniteltuja ilmavirtoja.

Diplomityön tutkimusmenetelmänä käytetään energiasimulointiin perustuvaa monitavoiteoptimointia. Osana tätä perehdytään ilmanvaihtojärjestelmän energiakustannusten määrittämiseen simulointityökalun avulla sekä investointikustannusten määrittämiseen laskennallisesti. Energiankulutuksen simulointityökaluna käytetään IDA ICE -ohjelmistoa. IDA -ohjelmistolla mallinnetaan ja simuloidaan kukin esimerkkikeittiö yhtenä tilana eli vyöhykkeenä. Vyöhykkeisiin mallinnetaan ilmanvaihtojärjestelmä sekä sisäiset lämpökuormat. Elinkaarikustannuksien määrittämisessä otetaan huomioon ilmanvaihtojärjestelmään liittyvät, vaihtoehtojen vertailun kannalta oleelliset investointi- sekä huoltokustannukset.

Tutkimuksen tavoitteena on optimoida ainoastaan ilmanvaihtojärjestelmän energiatehokkuutta, eikä esimerkiksi keittiöiden ulkovaipan rakenteita tutkita. Tutkimuksessa vertaillaan viittä eri lämmöntalteenottovaihtoehtoa ja kolmea ilmanvaihdon ohjaustapaa. Tällöin erilaisia ratkaisuvaihtoehtoja järjestelmille muodostuu 15 kappaletta kullekin keittiölle. Kaikille ratkaisuvaihtoehdoille määritetään energiasimuloinnin perusteella vuosittaiset ostoenergiakustannukset sekä investointikustannukset, jotka sisältävät myös nykyarvoon diskontatut huoltokustannukset. Nämä ovat monitavoiteoptimoinnin kohdefunktiot, joille pyritään löytämään optimaalinen ratkaisu. Monitavoiteoptimoinnin lisäksi jokaiselle ratkaisulle lasketaan nykyarvomenetelmällä elinkaarikustannukset ja vaihtoehtoja vertaillaan myös tämän laskennan perusteella.

2 Ammattikeittiöiden ilmanvaihto

2.1 Taustaa

2.1.1 Ammattikeittiöt Suomessa

Suomessa toimii noin 22 000 ammattikeittiötä ja näissä valmistetaan vuosittain yli 810 miljoonaa ateriaa. Vuosittain ammattikeittiöt kuluttavat Suomessa sähköä ja lämpöä noin 2,4 TWh, josta ruuanvalmistuksen, kylmäsäilytyksen ja astianpesun osuus on noin 26 %. Suurin osa keittiöiden energiantarpeesta kuluu lämmitykseen sekä ilmanvaihtoon, sillä keittiöiden ilmanvaihtotarve on suuri. (Motiva Oy 2016a.)

Ilmanvaihtoratkaisuilla voidaan vaikuttaa merkittävästi ammattikeittiöiden energiankulutukseen. Perinteisen ilmanvaihtoratkaisun energiankulutus voi olla jopa 10-kertainen verrattuna optimoituun ratkaisuun. (Reisbacka et al. 2009.)

2.1.2 Ammattikeittiötyypit

Ammattikeittiöt voidaan luokitella keskus-, lämmitys-, jakelu-, valmistus- sekä komponenttikeittiöihin. Keskuskeittiössä valmistetaan ruokaa toimitettavaksi muihin keittiöihin. Ruoka näistä toimitetaan joko kuumana jakelukeittiöihin tai jäädytettynä lämmityskeittiöihin. Lämmityskeittiöissä kuumennetaan keskuskeittiön tuotteiden lisäksi ei-neksiä sekä pakasteita, ja esimerkiksi salaattit voidaan valmistaa itse. Jakelukeittiöissä jaetaan muualla valmistettu ruoka, eikä niissä ole ollenkaan varsinaista ruuanvalmistusta. Valmistuskeittiöissä valmistetaan ruoka pääosin itse lähinnä omaa käyttöä varten. Komponenttikeittiöt ovat valmistuskeittiöitä, joissa ruoka valmistetaan esivalmistelluista raaka-aineista. (Rakennustieto Oy 2000, s. 1.)

Ammattikeittiöt voidaan jakaa tyyppikeittiöihin ruuanvalmistusprosessin ja ravintolan toiminnan perusteella. Nämä tyyppikeittiöt ovat

- kokopäivähoitolaitokset
- koulut ja päiväkodit
- henkilöstö- ja opiskelijaravintolat
- ravintolat, joissa ruoka valmistetaan välittömästi asiakkaiden tilausten mukaan. (Sandberg 2014, s. 510.)

Kaikissa näissä tyyppikeittiöissä on ruuan valmistustila sekä astianpesuosasto ja kylmäsäilytystila (Sandberg 2014, s. 510). Ruuan valmistuksessa käytettävät laitteistot voivat vaihdella suuresti riippuen keittiötyypistä (Rakennustieto Oy 2000, s. 2).

Kokopäivähoitolaitoksiin kuuluvat sairaalat, terveyskeskukset, hoivalaitokset, vankilat ja varuskunnat. Näissä valmistetaan päivän kaikki ateriat vuoden jokaisena päivänä. Osa aterioista, esimerkiksi hoivaosastojen päiväkahvit ja iltapala, toimitetaan elintarvikkeina ja osa valmiina ruokana. Kypsennyslaitteina kokopäivähoitolaitoksissa käytetään usein patoja ja uuneja sekä joskus paistinpannuja. Erityisruokavalio-annosten valmistukseen tarvitaan erilliset laitteet. (Reisbacka et al. 2009.)

Kouluravintolat toimivat noin 190 päivänä vuodessa. Näiden ravintoloiden keittiöt voivat olla valmistus- tai lämmityskeittiöitä. Valmistuskeittiöissä ruoka voidaan valmistaa vain oman koulun tarpeisiin, jolloin ruuanvalmistus keskittyy aamupäivään. Lisäksi keittiössä pestään astioita iltapäivän aluksi. Tällä tavoin keittiön käyttöaste jää alhaiseksi, mistä johtuen kouluravintoloihin pyritäänkin keskittämään useamman koulun ja päiväkodin ruuanvalmistus. Tällöin myös esimerkiksi erityisruokavalio-annokset pystytään valmistamaan tehokkaammin suuremmissa erissä. (Reisbacka et al. 2009.)

Henkilöstö- ja opiskelijaravintoloissa on lounaalla tarjolla yleensä useampi ruokalaji ja ne ovat toiminnassa vuoden ympäri. Useamman ruokalajin menekkiä on hankalampi arvioida, kuin yhden. Lounaan lisäksi henkilöstö- ja opiskelijaravintoloissa voidaan tarjoilla aamuisin ja iltapäivisin kahvia sekä syötävää. Ruuanvalmistusmenetelmät ovat usein samantapaiset kun ravintoloissa. Eri ruokalajeja tulisi valmistaa menekin mukaan, mutta tähän tarkoitukseen kyseisiin keittiöihin valitut laitteet ovat kapasiteetiltaan monesti liian suuria. Hauteet ja astianpesukone ovat päällä usein tarpeettoman suuren osan päivästä. (Reisbacka et al. 2009.)

Ruoka- ja seurusteluravintoloissa annokset valmistetaan välittömästi asiakkaan tilauksen perusteella. Ruuan pitää valmistua nopeasti, joten joitakin laitteita, kuten rasvakeittintä, liettä tai parilaa, pidetään jatkuvasti päällä. Ravintoloiden keittiöt ovat valmistus- tai kuumennuskeittiöitä tai niiden yhdistelmiä. Usein ravintoloiden keittiöt suunnitellaan mahdollisimman pieneksi, jotta ruokailusallille jää enemmän tilaa. Tämä aiheuttaa ongelmia keittilaitteiden sijoitukselle, ja esimerkiksi kylmä- ja kuumalaitteet joudutaan usein sijoittamaan lähekkäin. Ravintoloihin sopivat erityisesti induktioliedet, joilla säävutetaan merkittävä energiansäästö sekä pienempi lämpökuorma verrattuna muihin liesityyppeihin. (Reisbacka et al. 2009.)

2.1.3 Ammattikeittiöiden sisäilmasto-ongelmat ja ilmanvaihdon tehtävät

Ilmanvaihdon tarve ammattikeittiöissä on erilainen kuin muualla rakennuksessa. Keittiöissä ilmanvaihdon tarpeeseen vaikuttavat lähinnä keittiön prosessit ja keittilaitteet. (Rakennustieto Oy 2000, s. 2.) Ongelmiksi keittiöissä muodostuu helposti korkea ilman lämpötila ja laitteiden lämpösäteily, veto, suuri ilmankosteus, ilman epäpuhtaudet, hajut sekä melu. Hyvin toimivalla ilmanvaihtojärjestelmällä voidaan kaikkiin näihin ongelmatekijöihin vaikuttaa. (Sandberg 2014, s. 510–511.)

Rakennuksien sisäilmasto vaikuttaa suuresti siellä oleskelevien ihmisten terveyteen, viihtyisyyteen sekä suorituskykyyn. Ammattikeittiöissä työskentelyolosuhteet ovat usein erittäin haastavat, mikä korostaa sisäilmaston ja hyvän ilmanvaihdon merkitystä. Ruuanlaitossa vapautuu kaasua ja partikkelimuodossa runsaasti ilmaan terveydelle vaarallisia epäpuhtauksia, joille keittiöhenkilökunta altistuu ilmanvaihdon ollessa puutteellinen. Lisäksi kuuma työympäristö on fyysisesti rasittava ja heikentää työn tuottavuutta. (Sandberg 2014, s. 510–512.) Viihtyvyyteen ja työturvallisuuteen vaikuttaa negatiivisesti myös melu, joka on usein ongelma ammattikeittiöissä. Tanskalaisen tutkimuksen mukaan laitoskeittiöiden henkilökunta koki melun merkittävämmäksi yksittäiseksi sisäilmasto-ongelmaksi. Erityisen suureksi ongelmaksi melu koettiin astianpesun läheisyydessä. (Stogevičius 2014.)

Kaasumaisten yhdisteiden osuus epäpuhtauksista sekä partikkelien kokojakauma vaihtelee käytettyjen prosessien ja raaka-aineiden mukaan. Suurimmat päästöt ovat paistoprosesseissa ja useiden tutkimusten mukaan nämä päästöt ovat terveydelle vaarallisia. Muun muassa Thiebaud et al. (1995) osoitti tutkimuksessaan, että naudan ja sian lihan paistamisessa syntyvät päästöt ilmaan ovat karsinogeenisia. Lisäksi Vainiotalo ja Matveinen (1993) osoittivat kenttämittauksissaan kahdeksassa keittiöissä syntyvän runsaasti terveydelle haitallisia yhdisteitä. Näiden tutkimusten mukaan kokit voivat altistua työssään jatkuvasti suhteellisen korkeille määrille haitallisia ilman epäpuhtauksia. Esimerkiksi singaporelaisilla ja kiinalaisilla keuhkosyöpä on suhteellisen yleistä huolimatta tupakoinnin vähäisyydestä naisten keskuudessa. Keuhkosairauksien ja säännöllisen ruuanlaiton välillä onkin osoitettu olevan selvä yhteys. (Ng et al. 1993; Seow et al. 2000.) Tehokkaalla keittiöilmanvaihdolla voidaan vaikuttaa merkittävästi siihen, kuinka suurille päästöpitaisuuksille kokit joutuvat altistumaan.

Keittiön prosesseista vapautuu suuri määrä lämpöä konvektiolla huoneilmaan ja säteilemällä toisille huonepinnoille. Lämpöolot taas vaikuttavat merkittävästi työtehoon. Lämpöoloihin vaikuttavat ilman lämpötilan lisäksi pintojen lämpösäteily, ilmankosteus ja -nopeus sekä lämpötilojen erot ja vaihtelut. Liian korkea tai matala lämpötila lisää onnettomuusriskiä. Liian korkea lämpötila aiheuttaa lisäksi väsymystä, ja lämpimämpi ilma tuntuu tunkkaisemmalta ja kuivemmalta kuin viileämpi ilma. Liian kylmä ilma taas lisää vedon tunnetta ja heikentää käsivoimia sekä sorminäppäryyttä. Liian korkea ilmankosteus edistää homeiden kasvua ja lisää työntekijöiden lämpörasitusta. Kaikista näistä tekijöistä johtuen epätyytyttävät lämpöolot lisäävät vaihtuvuutta keittiöhenkilökunnassa, mikä heikentää myös osaltaan keittiön taloudellista tuottavuutta. (Rakennustieto Oy 2000, s. 2-4; Livchak et al. 2005.)

Ammattikeittiöiden ilmanvaihdolla on tarkoitus ylläpitää viihtyisät ja terveelliset työskentelyolosuhteet keittiössä. Ilmanvaihdon tehtävänä on poistaa ruuanvalmistusprosesseissa syntyvät epäpuhtaudet ja hajut sekä valmistusprosessien lisäksi astianpesussa syntyvä kosteus ja ylimääräinen lämpö. Ammattikeittiöitä koskevat tarkat hygieniavaatimukset, joiden täyttymiseksi ilmanvaihdolla on myös suuri merkitys. (Sandberg 2014, s. 510–511; Reisbacka et al. 2009.) Keittiöissä edellytetään siis ilmanvaihtoa, jolla hajut, epäpuhtaudet sekä lämpö voidaan poistaa tehokkaasti työskentelyalueelta. Tämän lisäksi ilmanvaihdon tulee pitää keittiö alipaineisena muihin tiloihin nähden, jotta näiden ongelmatekijöiden leviäminen ympäröiviin tiloihin saadaan estettyä. (Sandberg 2014, s. 512.)

Terveys- ja viihtyvyysongelmien lisäksi poistoilman epäpuhtaudet ovat myös merkittävä paloturvallisuusriskin aiheuttaja. Tämä tulee huomioida ilmanvaihtojärjestelmän suunnittelussa ja puhdistuksessa. (Sandberg 2014, s. 510–512.)

2.2 Keittiöilmanvaihtoa koskevat määräykset ja ohjeet

2.2.1 Suomen rakentamismääräyskokoelma

Ammattikeittiöiden ilmanvaihdon suunnittelua koskevat velvoittavat määräykset annetaan Suomen rakentamismääräyskokoelmassa. Kokoelman osa D2 käsittelee rakennusten sisäilmastoa sekä ilmanvaihtoa. Osassa E7 käsitellään ilmanvaihtolaitosten paloturvallisuutta ja osassa D3 rakennusten energiatehokkuutta myös ilmanvaihtojärjestelmän osalta. Suomen rakentamismääräyskokoelma sisältää maankäyttö- ja rakennuslakia sekä

asetusta täydentäviä säännöksiä ja ohjeita. Asetuksena annetut ja rakentamismääräyskoelmaan kootut säännökset ovat velvoittavia, kun taas ministeriön antamat ohjeet eivät ole. (Edilex 2017.)

Vuonna 2013 astui voimaan maankäyttö- ja rakennuslain muutos, jonka seurauksena rakentamista koskevat asetukset uudistetaan vuoteen 2018 mennessä. Suomen rakentamismääräyskokoelman aiempia määräyksiä ja ohjeita voidaan soveltaa siihen asti, että uudet säännökset on annettu. (Edilex 2017.) Uudet asetukset ja ministeriön ohjeet sekä valtion muiden viranomaisten antamia rakentamista koskevia määräyksiä kootaan Suomen rakentamismääräyskokoelmaan, jota ylläpitää ympäristöministeriö (Maankäyttö- ja rakennuslaki 13 §).

Siirtymäajan aikana koko rakentamismääräyskokoelma uusitaan siten, että uudet rakentamista koskevat vaatimukset annetaan asetuksina. Vuoden 2017 alusta astui voimaan rakennusten energiatehokkuutta koskeva maankäyttö- ja rakennuslain muutos, jonka vaatimukset sisältyvät kolmeen erikseen annettavaan asetukseen. Näistä yksi on ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta.

Ympäristöministeriö tilasi Suomen LVI-liitto SuLVI ry:ltä selvityksen osion D2 uusintatarpeen kartoittamiseksi talvella 2014. Työssä arvioitiin D2:en muutos- ja kehitystarve erityisesti energiatehokkuuden parantamisen kannalta, kuitenkin huomioiden sisäilman terveellisyys ja ilmanvaihdon toiminta. Työssä käytiin läpi myös osion D3 ilmanvaihdon energiatehokkuutta käsittelevät asiat. Lisäksi kartoitettiin erillisselvitysten tarve. Selvitys koostui suureksi osaksi alan asiantuntijoiden arvioista. Lisäksi selvityksessä huomioitiin eurooppalaisten ilmanvaihtoon liittyvien standardien kehitystyö sekä viimeisimpiä sisäilmastoon ja ilmanvaihtoon liittyviä tutkimuksia. Selvityksen mukaan keittiöiden osalta tulisi tarkistaa keittiöiden luokittelu sekä minimi-ilmavirrat. Pääasias- sa näiden ilmavirtojen todettiin olevan tarpeettoman suuria nykyaikaisiin keittiöihin. (Seppänen et al. 2014, s. 3-4 ja 126.)

Vielä tämän työn kirjoitushetkellä voimassa olevassa Suomen Rakennusmääräyskoelman osassa D2 (2012) on annettu ammattikeittiöille minimi-ilmavirrat ulko- ja poistoilmavirroille, äänitasot sekä ilman maksiminopeudet kesällä ja talvella. Nämä on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Ruuanvalmistustilojen minimi-ilmavirrat, äänitaso ja ilman nopeus Suomen Rakennusmääräyskokoelman osan D2 mukaan.

Ulkoilma- virta	Poistoilma- virta	Äänitaso $L_{A,eq,T}/L_{A,max}$	Ilman nopeus talvi / kesä
$(dm^3/s)/m^2$	$(dm^3/s)/m^2$	dB	m/s
15	15	38 / 43	0,25 / 0,50
10	10	38 / 43	0,25 / 0,50
5	5	38 / 43	0,25 / 0,50
3	30 $dm^3/s/keittiö$	33/38	0,20 / 0,40

2.2.2 Ammattikeittiöiden sisäilmastoluokittelu

Rakennustieto Oy on julkaissut tietokokoelmia ohjeistukseksi muun muassa rakennusten ilmanvaihtosuunnitteluun. Näitä ohjeita voidaan soveltaa ja käyttää muita ratkaisuja

niin, että rakentamismääräykset kuitenkin täyttyvät. Ammattikeittiön ilmanvaihtosuunnittelussa voidaan hyödyntää muun muassa seuraavia Rakennustieto Oy:n julkaisemia ohjekortteja:

- LVI06-10304 Ammattikeittiöiden sisäilmaston suunnittelu
- RT94-11164 Ravintolat ja kahvilat
- RT07-10946 Sisäilmastoluokitus 2008.

Kortissa LVI06-10304 Ammattikeittiöiden sisäilmaston suunnittelu esitellään ammattikeittiöiden sisäilmastoluokittelu. Tässä luokittelussa sisäilmasto jaetaan kolmeen luokkaan: Sk1, Sk2 ja Sk3. Luokittelua voidaan soveltaa kaikkiin ammattikeittiötyyppeihin, ja sen tarkoituksena on esittää tilaajalle vaihtoehtoisia sisäilmaston tavoitetasoja ja niiden vaikutuksia esimerkiksi kustannuksiin. Lisäksi luokittelussa esitetään suunnittelijalle järjestelmäratkaisuja, joilla valitut tavoitetasot voidaan saavuttaa. (Rakennustieto Oy 2000, s. 3-6.)

Sisäilmastoluokittelun avulla määritetään sisäilmastolle tavoitellut ohjearvot. Keittiön sisäilmaston laatutaso ja sisäilmastoluokka tulisi valita jo ilmanvaihtosuunnittelun alkuvaiheessa. Taulukossa 2 on esitetty ohjearvot sisäilmastolle eri tasoluokissa. (Rakennustieto Oy 2000, s. 3-6.)

Taulukko 2. Ruuanvalmistus- ja astianpesuosaston sisäilmaston ohjearvot eri tasoluokissa ammattikeittiöiden sisäilmastoluokittelun mukaan.

Ruuvalmistus	Yksikkö	Luokka		
		Sk1	Sk2	Sk3
Sisälämpötila talvi	°C	19...21	19...21	19...22
Sisälämpötila kesä	°C	19...23	19...25	19...28
Sisälämpötilan säädettävyyden	°C	± 2	± 2	-
Sisälämpötilan hetkellinen poikkeama asetusarvosta	°C	± 2	± 3	± 4
Vertikaalinen lämpötilaero	°C/m	< 2	< 3	< 4
Säteilyepäsymmetria	°C	< 10	< 20	< 30
Ilman suhteellinen kosteus	%	< 70	< 70	< 70
Ilman enimmäisnopeus	m/s	Erillisen kuvan mukaan		
Lämmitys- ja ilmastointilaitteiden äänitaso	dB(a)	< 40	< 40	< 40
Astianpesu				
Sisälämpötila talvi	°C	18...20	18...20	18...21
Sisälämpötila kesä	°C	18...22	18...24	18...28
Sisälämpötilan säädettävyyden	°C	± 2	± 2	-
Sisälämpötilan hetkellinen poikkeama asetusarvosta	°C	± 2	± 3	± 4
Vertikaalinen lämpötilaero	°C/m	< 2	< 2	< 3
Säteilyepäsymmetria	°C	< 5	< 10	< 15
Ilman suhteellinen kosteus	%	< 70	< 70	< 70
Ilman enimmäisnopeus	m/s	Erillisen kuvan mukaan		
Lämmitys- ja ilmastointilaitteiden äänitaso	dB(a)	< 40	< 40	< 40

Luokassa Sk1 pyritään saavuttamaan mahdollisimman korkeat sisäilmasto-olosuhteet. Tällöin keittiötä palvelee oma ilmanvaihtojärjestelmänsä. Erityyppiset työpisteet jaetaan säätövyöhykkeisiin, jolloin sisäilmaolosuhteita voidaan hallita myös työpistekohtaisesti.

Säästövyöhykkeiden määrä riippuu keittiön koosta ja keittiölaitteiden sijoittelusta. (Rakennustieto Oy 2000, s. 3-6.)

Myös luokassa Sk2 keittiö varustetaan omalla ilmanvaihtojärjestelmällä, ja ruuanvalmistus sekä astianpesu erotetaan omiksi säästövyöhykkeiksi. Tällöin työpistekohtaista olosuhteiden säätöä ei ole. Sisäilmaston ohjearvot ovat jonkin verran luokkaa Sk1 väljemmät, mutta myös luokka Sk2 edustaa hyvää suunnittelukäytäntöä. (Rakennustieto Oy 2000, s. 3-6.)

Luokka Sk3 vastaa viranomais määräysten mukaista vähimmäistasoa. Tässä luokassa ilmanvaihto toteutetaan ensisijaisesti omalla ilmanvaihtojärjestelmällä tai vaihtoehtoisesti omalla säästövyöhykkeellä niin, ettei keittiön ilmanvaihto ole riippuvainen ympäröivistä tiloista tai niiden ilmanvaihtolaitteistoista. (Rakennustieto Oy 2000, s. 3-6.)

2.2.3 EU-säädökset ja ekosuunnittelu

Kansalliseen lainsäädäntöön vaikuttaa määräykset Euroopan Unionin taholta. Rakennusten ilmanvaihtoa koskee erityisesti rakennusten energiatehokkuusdirektiivi (2010/31/EU), ekosuunnitteludirektiivi (2009/125/EY) sekä energiamerkintädirektiivi (2010/30/EU).

Tuotteiden suunnittelusta säädetään Euroopan parlamentin ja neuvoston ecodesign-direktiivissä (ekosuunnitteludirektiivi) (2009/125/EY) ja tuotteiden energiamerkinnästä energiamerkintädirektiivissä. (2010/30/EU). Direktiivien tavoitteena on parantaa energiaa käyttävien tuotteiden energiatehokkuutta, auttaa käyttäjää energiatehokkaan tuotteen valitsemisessa sekä samalla vähentää tuotteiden negatiivisia ympäristövaikutuksia. Nämä direktiivit ovat puitedirektiivejä, eli ne eivät itsessään aseta teknisiä velvoitteita tuotteiden valmistajille ja maahantuojille. Poikkeuksena on ekosuunnitteludirektiivin vaatimus CE-merkinnästä ja EU-vaatimusten mukaisuusvakuutuksesta. Muut velvoitteet astuvat voimaan tuoteryhmäkohtaisten asetusten muodossa. Suomessa nämä direktiivit ovat saatettu voimaan ekosuunnittelulaille (1005/2008), ja tuotekohtaiset asetukset ovat voimassa sellaisenaan. (Ympäristöministeriö 2013.)

Ekosuunnitteludirektiivin täytäntöönpanoa koskee rakennuksen ilmanvaihtolaitteiden osalta ekosuunnitteluasetus 1253/2014 ja energiamerkinnän osalta energiamerkintäasetus 1254/2014. Ekosuunnitteluasetuksessa 1253/2014 annetaan ilmanvaihtolaitteistoja koskevia määräyksiä, jotka astuvat voimaan kahdessa vaiheessa. Ilmanvaihtolaitteistojen energiatehokkuutta koskevia 1.1.2016 voimaan astuneita määräyksiä ovat

- Ilmanvaihtokoneiden (lukuun ottamatta kaksitoimintoiset) tulee olla varustettu moninopeusohjauksella tai taajuusmuuttajalla.
- Lämmöntalteenotto (LTO) on pakollinen kaikissa kaksi-ilmavirtaisissa ilmanvaihtokoneissa.
- LTO-järjestelmässä tulee olla lämpötekninen ohitusmahdollisuus.

Lisäksi annetaan vähimmäisarvot ilmanvaihtojärjestelmän puhaltimien hyötysuhteelle ja lämmöntalteenottolaitteistojen lämpötilahyötysuhteelle sekä vaatimukset ilmanvaihtojärjestelmän ominaissähköteholle (SFP_{int}). 1.1.2018 nämä vaatimukset tiukentuvat edelleen. (Komission asetus (EU) N:o 1253/2014.)

2.3 Ammattikeittiöiden ilmanvaihtoratkaisut ja energiatehokas suunnittelu

2.3.1 Yleistä

Ammattikeittiössä ilmanvaihdon kannalta tärkeää on riittävä poistoilmavirta sekä oikein sijoitetut kohdepoisto- ja tuloilmalaitteet. Keittiö suunnitellaan alipaineiseksi ympäröiviin tiloihin nähden. Vastaanottovaiheessa ilmavirrat tulee mitata ja säätää tarpeenmukaisiksi. (Sandberg 2014, s. 512–513.)

Ammattikeittiön ilmanvaihtotarve eroaa usein merkittävästi muun rakennuksen tarpeesta, mistä johtuen keittiö varustetaan usein erillisellä ilmanvaihtojärjestelmällä. Ammattikeittiöissä tulee käyttää koneellista tulo- ja poistoilmanvaihtoa. Keittiön toimiva ilmanvaihto koostuu erilaisista kohdepoistolaitteista, eli huuvista, yleispoistosta sekä tuloilmalaitteistosta. Tulo- ja poistoilmanvaihto voidaan myös integroida ilmanvaihtokattoon. Ilmanvaihtojärjestelmä jaetaan säätövyöhykkeisiin, joilla ilmavirta ja mahdollisesti myös tuloilman lämpötila on säädettävissä. Säätövyöhykkeet toteutetaan yhdellä tai useammalla ilmastointikoneella. (Rakennustieto Oy 2000, s. 5-6.)

Sisäilmastotavoitteet ja -luokka on keskeisin LVI-suunnittelun laatutasopäätös, joten nämä tulisi määrittää aivan ilmanvaihtosuunnittelun alkuvaiheessa. On tärkeää, että tilaaja ymmärtää sisäilmastotason merkityksen sekä vaikutukset investointi- ja käyttökustannuksiin. (Rakennustieto Oy 2000, s. 5.)

Ilmastoinnin perusprosesseista ammattikeittiöissä käytetään yleensä tuloilman lämmitystä ja jäähdytystä. Ilman kostutusta ei yleensä tarvita, sillä keittiölaitteista ja astianpesusta vapautuu suuri määrä kosteutta ilmaan. Tuloilmakoneen varustaminen koneellisella jäähdytyksellä on yleensä tarpeellista sisäilmaluokissa Sk1 ja Sk2. (Rakennustieto Oy 2000, s. 5 ja 9.)

Ilmanvaihtokanavissa keittiöissä ja keittiöiden ulkopuolella tulee käyttää paloturvallisuuden vuoksi paloeristysluokkaa EI60 ja EI120 (Sandberg 2014, s. 512).

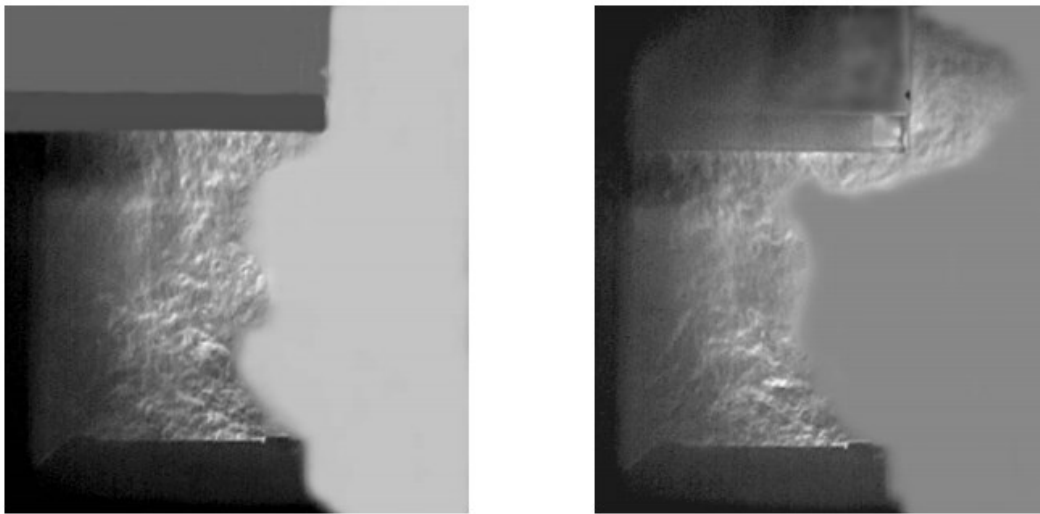
2.3.2 Poistoilmaratkaisut ja -laitteet

Poistoilmaratkaisuina ammattikeittiöissä käytetään kohdepoistoja, ilmanvaihtokattoa tai näiden yhdistelmää. Kohdepoistolaitteina käytetään yleensä huuvia. Kohdepoiston tarkoituksena on poistaa keittiön toiminnoista syntyvät epäpuhtaus-, lämpö- sekä kosteuskuormat ja näin estää niiden pääsy työskentelyvyöhykkeelle sekä edelleen oheistiloihin, kuten esimerkiksi ruokailutilaan. Tehokkailla kohdepoistoilla keittiön kokonaisilmavirtoja voidaan pienentää tilanteesta, joissa kohdepoistoja ei ole. (Sandberg 2014, s. 513; Rakennustieto Oy 2000, s. 7.) Kohdepoistojen poistoilma kuuluu poistoilmaluokkaan 4, eikä tätä ilmaa ei käytetä palautus- tai siirtoilmana. (Ympäristöministeriö 2012, s. 11–13.)

Huuvien tarkoitus on siepata ruuanlaitosta syntyvä konvektiovirtaus ja ne asennetaan suoraan keittiölaitteiden yläpuolelle. Huuvan tulee olla riittävän kokoinen: kaikilta reunoiltaan noin 30 cm keittiölaiteryhmää leveämpi, jotta ylöspäin levenevä konvektiovirtaus saadaan siepattua. Laiteryhmää leveämmäksi mitoitettu huuva lisää myös epäpuh-

tauksien poistotehokkuutta silloin, kun keittiössä esiintyy ristivirtauksia painesuhteiden ja oviaukkojen seurauksena. Huuvassa tulee olla myös riittävästi ilmatilaa, jotta se pysyy poistamaan äkilliset suuret kuormat. (Verein deutscher ingenieure 2006, s. 27; Reisbacka ym. 2009.) Huuvan poistotehokkuuden optimoimiseksi tulee se asentaa mahdollisimman alas, kuitenkin niin, että sen alapuolella on käytännöllistä työskennellä (American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers 2011, s. 33.17).

Huuvan hyötysuhdetta voidaan parantaa sieppaussuihkulla, joka estää epäpuhtauksien karkaamisen ja samalla tutkitusti pienentää poistoilmavirran tarvetta. Perinteinen huuva tarvitsee 1,3-kertaisen poistoilmavirran sieppaussuihkulliseen verrattuna, jotta saavutettaisiin sama poistotehokkuus. (Sandberg 2014, s. 512–516; Reisbacka ym. 2009.) Kuvassa 1 on esitetty tilanne, jossa samalla ilmavirralla korkean hyötysuhteen huuva pysyy sieppaamaan konvektiovirtauksen, kun osa konvektiovirtauksesta karkaa perinteisestä huuvasta.



Kuva 1. Korkean hyötysuhteen huuva (vasemmalla) ja perinteinen huuva (oikealla). (Reisbacka et al. 2009.)

Huuvaan voidaan asentaa päätypaneelit, jotka vähentävät ristivirtausten vaikutusta ja tällä tavalla parantavat huuvan poistotehokkuutta (Clark 2009). Eräässä tutkimuksessa päätypaneelien todettiin parantavan huuvan sieppausastetta, ja paneelit mahdollistivat poistoilmavirran alentamisen 15 prosentilla (Stogevičius 2014).

Huuvat jaetaan kahteen luokkaan sen mukaan, ovatko ne suunniteltu rasvaisen ilman käsittelyyn vai ei. Tyypin I huuvia käytetään keräämään ja poistamaan ilmasta rasvaa sekä muita ruuanlaitosta syntyviä epäpuhtauksia. Niissä on rasvanpoistolaitteisto sekä palontorjunta-laitteistoa. Tällaisia huuvia tulee käyttää ruuanvalmistuslaitteistojen yhteydessä, esimerkiksi liesien, uunien ja pariloiden kohdalla. (American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers 2011, s. 33.10.) Huuvien rasvanerotusta käsitellään tarkemmin kappaleessa 2.3.5.

Tyypin II huuvilla poistetaan ilmasta höyryä, lämpöä sekä hajuja, ja niitä voidaan käyttää siellä missä muita epäpuhtauksia ilmaan ei synny. Tämän tyypin huuvissa ei välttämättä ole rasvasuodattimia eivätkä ne yleensä sisällä palontorjuntalaitteita. Tyypin II huuvat jaetaan kahteen pääryhmään: sellaisiin, jotka sisältävät höyrynpoistolaitteiston ja sellaisiin, joilla on tarkoitus poistaa ilmasta ainoastaan lämpöä ja hajuja. Tyypin II huuvia käytetään astianpesun kohdepoistona tai kevyiden ruuan lämmityslaitteiden yläpuo-

lalla. (American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers 2011, s. 33.10; Clark 2012, s. 55.)

Kohdepoistojen lisäksi keittiössä tulisi olla myös yleisilmanvaihto, jonka kautta tulisi tyypillisesti poistaa noin 10 % kokonaispoistoilmavirrasta. Yleisilmanvaihdon tarkoituksena on poistaa niiden laitteiden yllämpö, jotka eivät ole suoraan kohdepoistojen alla, jolloin saadaan tasainen ilmanlaatu koko keittiössä. (Reisbacka ym. 2009.)

Keittiöissä käytetään myös ilmanvaihtokattojärjestelmiä, joihin on integroitu tulo- ja poistoilmanvaihto. Tällöin erillisiä kohdepoistolaitteita ei välttämättä ole. Tällöin lämmenneen ja epäpuhtauksia sisältävän ilman annetaan nousta konvektiovirtausten seurauksena kattoon, josta ne poistetaan. Ilmanvaihtokatto on esteettinen ratkaisu, joka soveltuu käytettäväksi esimerkiksi kattokorkeudeltaan mataliin keittiöihin. Ilmanvaihtokattoja käytetään esimerkiksi opetuskeittiöissä ja ravintoloissa, mutta tämä ei ole suositeltu ratkaisu, mikäli keittiössä on suuret epäpuhtaus-, lämpö- tai kosteuskuormat. Myös ilmanvaihtokaton epäpuhtauksien poistotehokkuutta voidaan parantaa katon suuntaisella sieppaussuihkulla, joka ohjaa epäpuhtauksia poiston suuntaan. (Sandberg 2014, s. 516–517.)

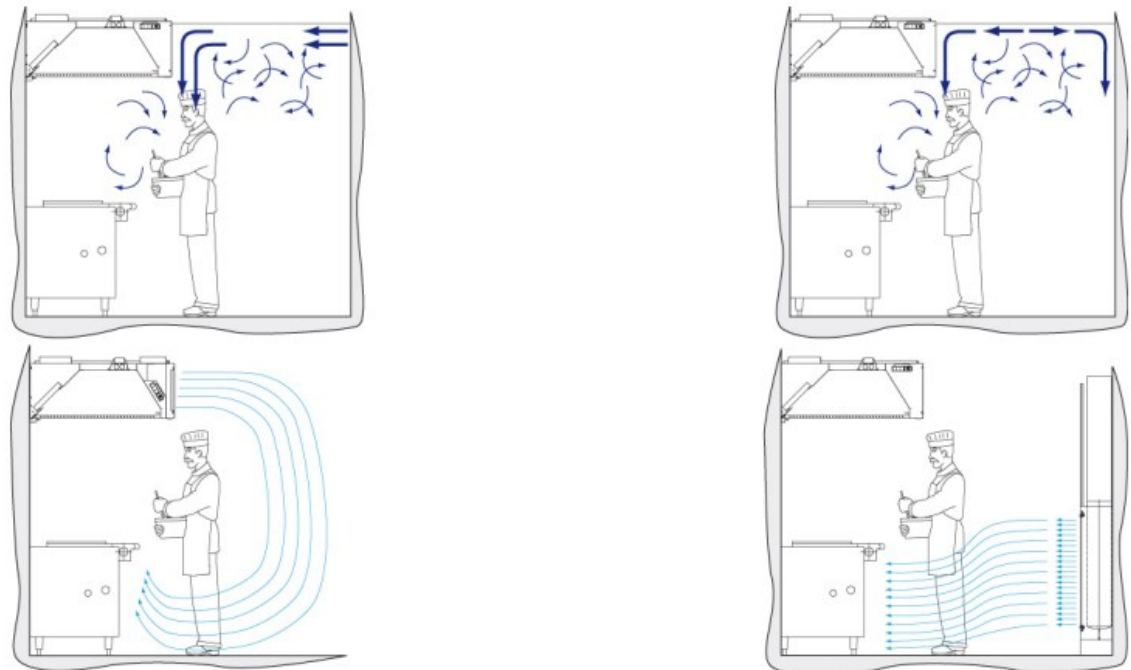
2.3.3 Ilmanjakoratkaisut ja -laitteet

Ilmanvaihdon suunnittelussa tilaa tulisi tarkastella kokonaisuutena, ja tuloilmaratkaisu valitaan tapauskohtaisesti. Suuresta ilmanvaihtotarpeesta johtuen myös ammattikeittiöön tuotavan korvausilman määrä on suuri. Tämä, yleensä alilämpöinen, korvausilma tulee tuoda tilaan hallitusti, eikä se saa aiheuttaa vetoa tai häiritä paikallispoistolaitteiden toimintaa. Tuloilmalaitteiden lisäksi olennaista on niiden sijoittelu. Ammattikeittiöiden tuloilmanjakoon soveltuvat parhaiten piennopeuslaitteet, ja ilmanjaon tulisi perustua ilman syrjäyttämiseen. Ilman sekoittumiseen perustuva ilmanjako soveltuu huonosti ammattikeittiöihin, sillä se sekoittaa myös keittiön toiminnoista syntyvät lämpö-, kosteus- ja epäpuhtauspäästöt työskentelyvyöhykkeelle. Piennopeuslaitteiden käyttöä rajoittaa ammattikeittiöissä kuitenkin usein tilanpuute. Tästä johtuen ilmanjakoratkaisuksi joudutaan usein valitsemaan normaalit kattohajottajat. Tällöin kattohajottajien paikka ja puhalluskuvio tulee valita niin, etteivät ne häiritse huuviin toimintaa. (Sandberg 2014, s. 514–515; Rakennustieto Oy 2000, s. 6.)

Ammattikeittiöissä ilmanvaihto voidaan toteuttaa ylä- tai alajakoisena. Yläjakoisessa järjestelmässä ilma tuodaan tilaan katossa tai huuvin sijaitsevilla tuloilmalaitteilla. Tällöin alilämpöinen ilma valuu lattialle, josta se nousee keittiölaitteista syntyvien konvektiovirtausten mukana kohdepoistoihin. Ilma tuodaan tilaan pienellä nopeudella, jotta sekoittuminen olisi mahdollisimman vähäistä. (Sandberg 2014, s. 514–515.) Huuvissa voi olla myös tuloilmasuuttimia, joita säätämällä voidaan hallita lämpötilaa työpistekohdasta. Tällöin ilma tulee suunnata hajottajilla huuvasta pois päin, jotta huuvin sieppaustehokkuus ei heikkenisi. (Clark 2009.) Alajakoisessa järjestelmässä tuloilma tuodaan piennopeuslaitteilla alilämpöisenä suoraan oleskeluvyöhykkeelle, johon se alilämpöisenä kerrostuu tiheyserojen vaikutuksesta. Oleskeluvyöhykkeellä ilma lämpenee, jolloin tämä lämmin ja epäpuhtauksia sisältävä ilma nousee vyöhykkeelle, josta se poistetaan. Tätä periaatetta kutsutaan termiseksi syrjäytykseksi. (Sandberg 2014, s. 514–515; Rakennustieto Oy 2000, s. 6–7.)

Yläjakoisessa järjestelmässä ilman sekoittumista tapahtuu enemmän kuin alajakoisessa järjestelmässä, jolloin alajakoisella järjestelmällä saavutetaan parempi epäpuhtauksien poistotehokkuus. Alajakoinen järjestelmä soveltuukin hyvin tilaan, joissa on suuret epäpuhtaus-, lämpö- tai kosteuskuormat. Alajakoinen järjestelmä toimii tehokkaammin tavallista korkeammassa huonetilassa, ja järjestelmän tuloilmalaitteiden vaatimat tilavauheet tulisi ottaa huomioon jo keittiön pohjaratkaisua suunniteltaessa. Yläjakoisessa järjestelmässä taas lämpötila on pystysuunnassa tasaisempi. Samassa keittiössä voidaan myös yhdistellä näitä ilmanjakotapoja. (Rakennustieto Oy 2000, s. 6.)

Keittiön yleisilmanvaihdon toteutustapa vaikuttaa tarvittavaan poistoilmavirtaan. Sekoittava ilmanvaihto vaatii 1,2-kertaisen poistoilmavirran verrattuna syrjäytysilmanvaihtoon, mikäli halutaan sama poistotehokkuus. (Sandberg 2014, s. 514–515.) Kuvassa 2 on esitetty, kuinka voimakkaat pyörteet huuuvan läheisyydessä heikentävät epäpuhtauksien poistotehokkuutta (yläpuoliset kuvat). Tuloilma tulisi tuoda keittiöön pienellä nopeudella, jolloin tuloilma ei häiritse huuvien poistotehokkuutta (alapuoliset kuvat).



Kuva 2. Tuloilman tuontitavan vaikutus epäpuhtauksien poistotehokkuuteen. (Reisbacka et al. 2009.)

2.3.4 Lämpötilojen hallinta

Ammattikeittiöiden prosesseista vapautuu lämpöä konvektiolla huoneilmaan ja säteilemällä tilan eri pinnoille. Tästä konvektion osuus voidaan poistaa kohdepoistoilla. Mikäli lämpötilaa halutaan hallita myös säteilyn osalta, tarvitaan tuloilman jäähdytystä kesäaikaana. Erityyppisillä keittiölaitteilla on erilaiset säteily- ja konvektio-osuudet lämpökuormista. Keittiöiden säteilykuormaa voidaan pienentää huomattavasti esimerkiksi käyttämällä induktioon perustuvia ruuanvalmistuslaitteita. (Sandberg 2014, s. 513.)

Lämpötilojen asetusarvot kesä- ja talviaikana eri sisäilmaluokissa esitettiin taulukossa 2. Näiden lämpötilojen ylärajoja käytetään ilmavirtojen ja mahdollisen tuloilman jäähdytyksen mitoittamiseen. Samassa taulukossa on esitetty myös sallitut hetkelliset poik-

keamat näistä asetusarvoista. Hetkellinen poikkeama tarkoittaa alle 15 minuuttia kestävä poikkeamaa. Missään luokassa sisäilman lämpötilan hetkellinen arvo ei saa kuitenkaan alittaa arvoa 18 °C. (Rakennustieto Oy 2000, s. 9.)

Sisäilman lämpötilaa voidaan hallita säätämällä automaattisesti tuloilman lämpötilaa sekä ilmavirtaa. Lämpötilan hallinta voidaan toteuttaa esimerkiksi pitämällä tuloilman lämpötilaa mahdollisimman alhaisena, ja sisäilman lämpötilaa säädetään ilmavirtojen avulla. Tuloilman lämpötilaa nostetaan vasta sitten, kun sisäilman lämpötila laskee alle asetusarvon ilmavirtojen ollessa vähimmäistasossa. Tällä tavoin saavutetaan mahdollisimman tehokas vapaajäähdytys ja energiatehokas ratkaisu. (Rakennustieto Oy 2000, s. 9.)

Luokissa Sk1 ja Sk2 tulee yleensä käyttää koneellista tuloilman jäähdytystä. Koneellinen jäähdytys voidaan jättää pois, mikäli pystytään laskennallisesti osoittamaan, että luokan lämpötilan tavoitearvot pystytään saavuttamaan kesäajan mitoitussuhteissa ilman jäähdytystä. Näin saattaa olla esimerkiksi silloin, kun keittiö ei ole kesäisin käytössä. (Rakennustieto Oy 2000, s. 9.)

Luokassa Sk1 pyritään työpistekohtaiseen säätöön lämpöolosuhteiden hallinnassa, jolloin työntekijöillä on mahdollisuus säätää työpisteen lämpötilan asetusarvoa taulukon 2 arvojen rajoissa. Luokassa Sk2 ruuanlaitto- ja astianpesuosaston lämpötiloja säädetään erikseen, ja työntekijöillä tulee olla mahdollisuus tarvittaessa muuttaa sisäilman lämpötilan asetusarvoa taulukon 2 mukaan. Tällöin lämpötilojen hallintaan tarvitaan vähintään kaksi mittauspistettä. Näissä luokissa ilmavirtoja voidaan säätää portaattomasti tai moniportaisesti. Jos eri säätövyöhykkeitä palvelee sama tulo- ja poistoilmakone, säätövyöhykkeet varustetaan lisäksi omilla säätöyksiköillä. Tällöin puhallinta ohjataan esimerkiksi kanavapaineen perusteella. (Rakennustieto Oy 2000, s. 9.)

Luokassa Sk3 koko keittiö käsitellään yhtenä säätövyöhykkeenä, jolloin lämpötilan hallintaan riittää yksi mittauspiste. Ilmavirtojen säätö on vähintään kaksiportainen. Tässä luokassa ilmavirtoja voidaan tehostaa käsin tai käyntiaikakellolla. (Rakennustieto Oy 2000, s. 9.)

2.3.5 Rasvanerotus

Ruuanlaittoprosesseissa vapautuu ilmaan lämmön lisäksi rasvaa, käryjä sekä hiilivetyyhdisteitä. Ruuanvalmistuksessa syntyvien epäpuhtauksien koostumukseen vaikuttaa suuresti käytetyt prosessit sekä raaka-aineet. Suurimmat rasvapäästöt syntyvät erilaisista paistoprosesseista. Rasva voi vapautua ilmaan kaasumaisessa tai partikkelimaisessa muodossa. Jäähdyessään kaasumaisessa muodossa oleva rasva saattaa tiivistyä partikkelimaiseksi. (American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers 2011, s. 33.5–33.7; Sandberg 2014, s. 511.)

Kanavistoon kerääntyvä rasva aiheuttaa paloturvallisuusriskin. Lisäksi poistoilmakanavistoon päätyvä rasva häiritsee ilmanpoistolaitteiston toimintaa kerääntyessään poistoilmapuhalttimeen ja muihin ilmanvaihtojärjestelmän osiin, mikä lisää tarvetta järjestelmän huoltoon ja sen osien uusimiseen. (American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers 2011, s. 33.5.) Ammattikeittiöissä kohdepoistolaitteistot tarvittaessa varustetaan rasvanerottimilla, jotta poistoilman sisältämän rasvan kul-

keutumista kanavistoon saataisiin vähennettyä. Tällä tavoin vähennetään kanaviston puhdistuksen tarvetta ja parannetaan paloturvallisuutta. (Rakennustieto Oy 2000, s. 9.)

Ilmansuodatuksen tavoitteena on saavuttaa mahdollisimman korkea erotusteho käyttäen tähän mahdollisimman vähän energiaa. Mekaanisten suodattimien energiankulutukseen vaikuttaa niissä tapahtuva painehäviö. Muun tyyppiset suodattimet saattavat kuluttaa lisäksi sähköenergiaa. Vaikka suodatus lisää ilmanvaihtojärjestelmän energiakustannuksia, saavutetaan merkittäviä säästöjä muun muassa siivous-, huolto- ja korjauskustannuksissa. (American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers 2011, s. 33.5.)

Rasvanerottimien tehokkuudella tarkoitetaan erottimen kykyä poistaa ilman epäpuhtaudet. Tehokkuus ilmoitetaan yleensä hiukkaskoon funktiona. Erityyppisten erottimien suodatuskyky on erilainen eri hiukkaskoilla. Tästä syystä olisi hyvä tuntee keittiössä käytettävät prosessit ja prosesseista syntyvien päästöjen koostumus jo silloin, kun rasvanerotinta valitaan, mutta käytännössä tämä on vaikeaa. (Rakennustieto Oy 2000, s. 9; American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers 2011, s. 33.8.)

Huuvissa käytettävillä mekaanisilla rasvanerottimilla poistetaan ilmasta suurempia partikkeleja ($>5\ \mu\text{m}$) (Sandberg 2014, s. 511). Useimpien tyypin I huuvien rasvanerottimet toimivat samalla periaatteella: poistoilma kulkee erottimen lamellien läpi, jolloin syntyvä keskipakovoima poistaa rasvapartikkelit ilmasta. Poistetun rasvan määrä vaihtelee muun muassa erottimen tyypistä, ilman nopeudesta ja lämpötilasta ja ruoanvalmistusprosessista riippuen. (American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers 2011, s. 33.10–33.11.)

Kaasumaisessa muodossa vapautuva rasva kulkeutuu mekaanisten ilmansuodattimien läpi suoraan poistoilmakanavaan, jossa se saattaa tiivistyä ja aiheuttaa ilmanvaihtojärjestelmän likaantumista. Näitä pienempiä partikkeleja voidaan hajottaa esimerkiksi UV-suodattimilla, joiden toiminta perustuu UV-valon ja lampuista syntyvän otsonin reaktioon rasvapartikkelien ja kaasumaisten epäpuhtauksien kanssa. Tässä reaktiossa rasva hajoaa hiilidioksidiksi ja vesihöyryksi, jotka eivät likaa kanavistoa. Reaktio ei kuitenkaan ole täydellinen, joten poistoilma tulee johtaa edelleen ulos. (Sandberg 2014, s. 511.) Rasvaa ja käryjä voidaan poistaa ilmasta myös suoraotsonoinnilla, jossa otsonia tuotetaan ilman happimolekyyleistä otsonaattorilla.

Markkinoilla on myös suodatusratkaisuja, joissa poistoilma suodatetaan useassa portaassa (esimerkiksi karkea-, hieno- ja kemiallinen suodatus). Tällaisilla ratkaisuilla ilma puhdistetaan niin hyvin, että se voidaan poistaa rakennuksesta suoraan katutasolta.

Joissakin rasvanerotintyypeissä likaantuminen aiheuttaa suodattimen painehäviön kasvua ja erotustehon alenemista. Erottimien puhdistustarve riippuu keittiössä käytetyistä ruoanvalmistusprosesseista. Mekaaniset erottimet voidaan irrottaa ja pestä tiskikoneessa. Huuvaan voidaan asentaa myös automaattinen vesipesu, joka puhdistaa erottimet ja mahdolliset UV-lamput aika ajoin. (Sandberg 2014, s. 511.)

2.3.6 Ilmanvaihdon energiatehokas mitoitus ammattikeittiöön

Ilmanvaihdon mitoituksen optimoinnilla voidaan pienentää ilmanvaihtojärjestelmän käyttö- ja investointikustannuksia. Mitoitusilmavirran ollessa pienempi, vastaavasti energiankulutus ja samalla käyttökustannukset ovat alhaisemmat. Tällöin myös tarvittavat kanavat ja puhaltimet ovat pienempiä, jolloin järjestelmän investointikustannukset pienenevät. Lisäksi käyttökustannuksia alentaa energiatariffissa alhaisemmiksi määritetyt huippu- ja liittymistehot. (Sandberg 2014, s. 515; Reisbacka ym. 2009.)

Suomen Rakennusmääräyskokoelman osassa D2 (2012) annetut minimi-ilmavirrat ammattikeittiöiden ulko- ja poistoilmavirroille esitettiin taulukossa 1. Näitä arvoja ei kuitenkaan tulisi käyttää perustana keittiöiden ilmavirtojen mitoituksessa. Ilmanvaihto tulisi mitoittaa aina tapauskohtaisesti, huomioiden laitekuormat, laitteiden sijoittelu, tuloilman jakotapa, poistoilmaratkaisut, laitteiden käytön samanaikaisuus sekä tavoiteltu sisäilmastotaso ja mahdollinen jäähdytys. Sisälämpötiloja voidaan myös simuloida, jolloin ilmanvaihdon mitoituksessa huomioidaan lisäksi esimerkiksi valaistuksen, ihmisten, auringon ja viereisten tilojen sekä rakenteiden vaikutus. (Rakennustieto Oy 2014, s. 16–17.)

Ilmavirtojen mitoituksen tulisi perustua pääasiassa tunnettuun keittiölaitteiden tehoon sekä laiteominaisuuksiin. Muilla menetelmillä ilmavirrat saatetaan mitoittaa turhan suuriksi. Mitoituksen perustana tulisi käyttää keittiölaitteista syntyvää termistä konvektiovirtausta. Mikäli tunnetaan laitteen konvektiivinen lämpöteho, voidaan tämän avulla laskea tarvittava poistoilmavirta. Tätä laskettua optimi-ilmavirtaa ei tule ylittää, mikäli halutaan energiatehokkain ratkaisu, sillä oleellista on poistaa vain konvektiovirtausta vastaava ilmamäärä. Ilmamäärän lisääminen ei paranna järjestelmän hyötysuhdetta, mutta lisää tarpeettomasti kustannuksia ja vectoriskiä. (Sandberg 2014, s. 513–516; Reisbacka ym. 2009.)

Tunnetuin lämpökuormaan perustuva mitoitusstandardi on saksalainen VDI 2052 (Verein deutscher ingenieure 2006), joka ottaa huomioon myös keittiölaitteiden asennuspaikan sekä käytetyn tuloilmaratkaisun. Tarvittava poistoilmavirta voidaan laskea kaavan 1 avulla:

$$q_{v,p} = k * (z + 1,7D_h)^{\frac{5}{3}} * (\phi_c)^{\frac{1}{3}} * r * \varphi \quad (1)$$

missä $q_{v,p}$ on tarvittava poistoilmavirta [m^3/s]
 z on poistolaitteen etäisyys keittiölaitteesta [m]
 φ on keittiölaitteiden samanaikaisuuskerroin (tyypillisesti $\varphi=0,5-0,8$) [-]
 ϕ_c on konvektiivinen lämpökuorma [W]
 k on kokeellinen kerroin (tavallisella huvalla $k=5$) [-]
 r on kerroin, joka ottaa huomioon keittiöryhmän asennuspaikan (vapaa $r = 1$, lähellä seinää $r = 0,63$, kulma $r = 0,43$) [-]
 D_h = hydraulinen halkaisija [m]

Keittiölaitteen hydraulinen halkaisija D_h voidaan laskea kaavalla 2:

$$D_h = \frac{2L*W}{L+W} \quad (2)$$

missä L on keittiölaitteen leveys [m]
 W on keittiölaitteen pituus [m]

Kun huomioidaan vielä ilmanjakotavan merkitys, voidaan tarvittava poistoilmavirta laskea kaavalla 3:

$$q_{v,exp} = q_{v,p} * K_{ads} \quad (3)$$

missä K_{ads} on kerroin, joka huomioi yleisilmanvaihdon tehokkuuden (esim. sekoitusilmanvaihto, jossa ilmanjako horisontaalisesti suurnopeuslaitteilla: $K_{ads} = 1,25$ ja piennopeusilmanvaihto, jossa tuloilmalaitteet sijoitettu oleskeluvyöhykkeelle: $K_{ads} = 1,05$) [-]

(Verein deutscher ingenieure 2006, s. 17–18.)

Kuten kaavasta 1 voidaan nähdä, tarvittavaan ilmavirtaan vaikuttaa suuresti myös keittiölaitteiden sijoitus. Samaan poistotehokkuuteen pyrittäessä, keskelle lattiaa sijoitettu ryhmä laite vaatii 1,6-kertaisen poistoilmavirran verrattuna seinän viereen sijoitettuun laiteryhmään. Tämä johtuu siitä, että keskelle lattiaa sijoitetusta laiteryhmästä lämmin ilma pääsee nousemaan ylöspäin suuremmalla vapaalla poikkipinta-alalla. (Sandberg 2014, s. 514.)

Kun keittiössä tarvittavat ilmavirrat määritetään tällä tavoin tarkasti lämpökuormien perusteella, suureksi haasteeksi voi muodostua keittiölaitteiden käyttöasteen arviointi. Tätä varten tulisi tuntea tarkasti jo etukäteen keittiön käyttöprofiili. Voi olla haastavaa arvioida, kuinka suuren osan ajasta keittiölaitteet ovat käytössä, valmiustilassa tai kokonaan pois päältä. Keittiön lämpökuormien oikeanlainen määrittäminen edellyttääkin keittiön koko suunnittelijanryhmän yhteistyötä ja ilmanvaihtosuunnittelijan osallistumista suunnitteluprosessiin projektin alkuvaiheesta asti. (American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers 2011, s. 33.10.)

Mikäli keittiölaitteiden lämpökuormia ja käyttöaikoja ei tiedetä tarkasti, voidaan kohdepoistojen ilmavirrat mitoittaa kaavan 4 avulla:

$$q_{kp} = \varphi * \sum P_i * q_i \quad (4)$$

missä q_{kp} on kohdepoiston ilmavirta [l/s]
 φ on keittiötyypin ohjeellinen samanaikaisuuskerroin [-]
 P_i on keittiölaitteen liitäntäteho [kW]
 q_i on keittiölaittekohtainen mitoituspoistoilmavirta [l/s/kW]

(Rakennustieto Oy 2000.)

Samanaikaisuuskertoimia sekä mitoituspoistoilmavirtoja keittiölaitteille löytyy Rakennustieto Oy:n ohjekortista LVI06-10304 Ammattikeittiöiden sisäilmaston suunnittelu.

Käytännössä kohdepoistojen ilmavirrat on kätevä mitoittaa laitevalmistajien mitoitusohjelmilla. Mitoituksen lisäksi tällaisilla ohjelmilla voidaan samanaikaisesti tehdä laitevalinnat. (Sandberg 2014, s. 513–516.)

Tuloilmavirta ammattikeittiöihin mitoitetaan niin, että poistoilmavirta on noin 10 % tuloilmavirtaa suurempi. Tällöin keittiö pysyy hieman alipaineisena ympäröivään tilaan nähden, eivätkä keittiössä syntyvät epäpuhtaudet leviä keittiön ulkopuolelle. (Sandberg 2014, s. 512.)

2.3.7 Lämmöntalteenotto

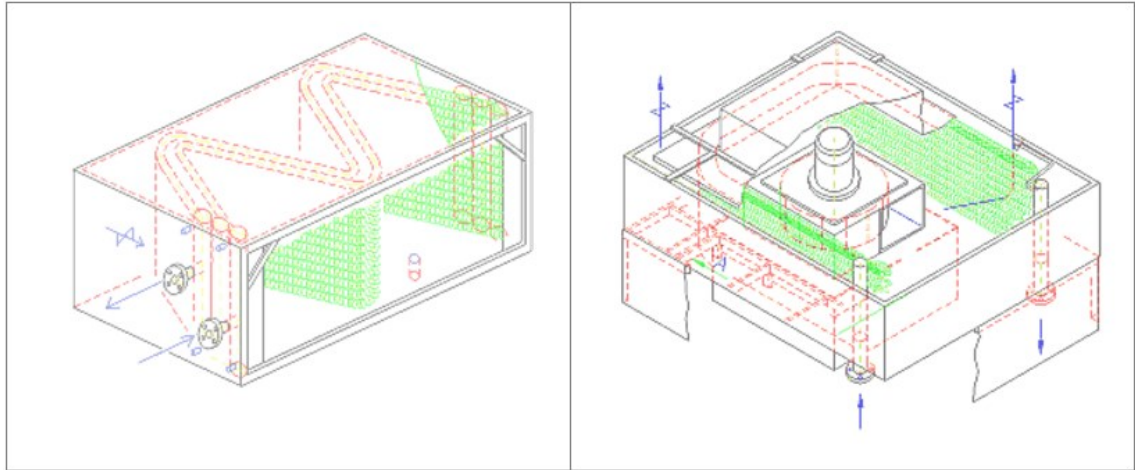
Poistoilman lämmöntalteenotolla voidaan parantaa koko ilmanvaihtolaitoksen energiatehokkuutta. Poistoilmasta voidaan siirtää lämpöä suoraan tuloilman lämmittämiseen tai lämpöpumpun avulla esimerkiksi käyttöveden lämmitykseen. (Sandberg 2014, s. 518.) Lämmöntalteenottolaitteen vuosihyötysuhde voi olla esimerkiksi 50 %, jolloin voidaan siis puolittaa ilmanvaihdon lämmitysenergian kulutus. Tyypillisen lämpöpumpun lämpökerroin on tyypillisesti noin 3, mikä tarkoittaa sitä, että yhdellä yksiköllä sähkötehoa saadaan poistoilmasta talteen kolme yksikköä lämpötehoa. (Reisbacka ym. 2009.)

Tämän hetkisten määräysten mukaan regeneratiivista lämmönsiirrintä voidaan käyttää vain, jos poistoilmassa on korkeintaan 5 % luokan 3 poistoilmaa, eikä lainkaan luokan 4 poistoilmaa. Kun otetaan lämpöä talteen luokan 4 poistoilmasta, tulisi yleensä käyttää virtaavan väliaineen välityksellä toimivaa lämmöntalteenottoa, jossa tulo- ja poistoilma eivät sekoitu. Mikäli yksi ilmanvaihtokone palvelee kuitenkin vain yhtä tilaa, voidaan lämmönsiirtimen tyyppi valita vapaasti, vaikka poistoilma olisi luokkaa 3 tai 4. Tällöin on varmistettava, että tilaan johdettava tuloilma on riittävän puhdasta, jotta sisäilman puhtaudelle asetetut vaatimukset täyttyisivät. (Ympäristöministeriö 2012, s. 17.)

Yleensä ammattikeittiöissä käytetään poistoilman epäpuhtauksista ja mahdollisesta otsonista johtuen nestekiertoista lämmöntalteenottojärjestelmää. Tällainen järjestelmä koostuu tulo- sekä poistoilmakanaviin sijoitetuista pattereista sekä kiertonesteputkistosta ja pumpusta. Kiertävänä nesteenä käytetään vesi-glykoliseosta. Lämmönsiirtiminä tulo- ja poistoilmassa toimivat neulaputki- tai lamellipatterit. (Rakennustieto Oy 2000, s. 9; Seppänen 2014, s. 264–265.)

Neulalämmönsiirrin on Retermia Oy:n valmistama lämmöntalteenottolaitte, jossa lämmönsiirtopintana toimii neulaputki. Patentoitu neulaputki valmistetaan alumiininauhasta ja kupari- tai alumiiniputkesta. Neulaputket taivutetaan joko aaltomaisesti tai U-mallisesti, minkä mukaan neulalämmönsiirtimet jaetaan kahteen päätyyppiin. Aaltomallinen neulaputki voidaan asentaa asiakkaan toimittamaan IV-koneen väliosaan tai Retermian valmistamaan runkoon ulkosäleikön tilalle, kanavan osaksi tai ilmanotto-/poistoilmakammioon. U-mallisia neulaputkia käytetään ilmanotto- ja ulospuhalluskateksissa sekä LTO-huippuimureissa. (Retermia Oy 2017.)

Neulalämmönsiirrin soveltuu hyvin keittiöiden rasvaisen poistoilman talteenottoon. Siirtimien etuna on suuri lämmönsiirtopinta-ala ja niiden aiheuttama pieni painehäviö. Siirtimet eivät myöskään tukkeudu helposti ja ne säilyttävät pienen painehäviönsä ja lämmönsiirtokykynsä huoltojen välillä. Neulalämmönsiirrin toimii myös karkeasuodatimena, jolloin erillistä karkeasuodatinta ei välttämättä tarvita. (Retermia Oy 2017.) Kuvassa 3 on esitetty vasemmalla aaltomallinen ja oikealla U-mallinen neulalämmönsiirrin.



Kuva 3. Aaltomallinen ja U-mallinen neulalämmönsiirrin. (Retermia Oy 2017.)

Epäsuoraa lämmöntalteenottojärjestelmää käytetään ammattikeittiöissä hygieniasyistä, sillä näin estetään poistoilman epäpuhtauksien ja hajujen siirtyminen tuloilmaan. Epäsuoraa järjestelmää suositaan myös siitä syystä, että poistoilmakoneen lämmöntalteenottopatterin lämmönsiirrinpinnat tulee pestä säännöllisesti, sillä näihin kertyy poistoilmasta rasvaa ja muita epäpuhtauksia. (Rakennustieto Oy 2000, s. 9.) Keittiön poistoilman likaisuuden perusteella oikein valittu toimiva rasvanerotus onkin olennainen osa lämmön talteenoton häiriötöntä ja mahdollisimman tehokasta toimintaa (Sandberg 2014, s. 518).

Lämmöntalteenotolla saavutettava taloudellinen hyöty on aina tapauskohtainen. Huomioon otettavia seikkoja ovat saavutettavat vuotuiset säästöt lämmitysenergiakustannuksissa, järjestelmän investointikustannukset sekä lämmöntalteenoton käytöstä aiheutuvat lisäkustannukset. Nämä lisäkustannukset muodostuvat nestepiirin pumppauskustannuksista, huoltokustannuksista sekä puhallinkustannuksista, jotka syntyvät lämmön talteenottopattereiden aiheuttamasta ylimääräisestä painehäviöstä. Keittiön toiminta-aika vaikuttaa merkittävästi siihen, kuinka paljon lämmitysenergiaa voidaan lämmöntalteenottolaitteistolla säästää, eli kuinka kannattavaa järjestelmän varustaminen lämmöntalteenotolla on. (Rakennustieto Oy 2000, s. 12 ja 14.) Kun tarkastellaan lämmöntalteenoton taloudellista kannattavuutta, tulisi huomioida ainakin seuraavat asiat:

- vuorokautinen käyttöaika
- säästetyn energian hinta ja käyttökustannukset
- poiston ja tuloilman keskinäinen etäisyys
- laitteiston koko
- erityisjärjestelyt puhdistuksen suhteen (suodatus ja pesujärjestelyt)
- tarvittavat erityismateriaalit, jos alumiini ja kupari eivät sovellu LTO-laitteiston materiaaleiksi
- käytettävissä olevat tilat
- käytettävissä olevat puhallinpaineet ja lämmöntalteenoton lisäämä painehäviö
- poistoilman ominaisuudet: lämpötila, kosteus ja epäpuhtaudet. (Motiva Oy 2016b, s. 66.)

Tuloilman vuosihyötysuhde kuvaa sitä, kuinka suuren osan tuloilman vuotuisesta lämmitystarpeesta lämmöntalteenotto kattaa. Lämmöntalteenoton lämpötilahyötysuhde taas

vertaa tuloilman lämpötilan nousua lämmöntalteenottolaitteessa poisto- ja ulkoilman väliseen lämpötilaeroon (kaava 5). (Sandberg 2014, s. 134, 450–451.)

$$\eta_{Ttulo} = \frac{T_{tulo} - T_{ulko}}{T_{poisto} - T_{ulko}} \quad (5)$$

(Sandberg 2014, s. 134, 450–451.)

Ekosuunnitteluasetus keskittyy ilmanvaihdon osalta lämpötilahyötysuhteen parantamiseen. Asetuksen mukaan lämpötilahyötysuhde tulee olla 1.1.2016 jälkeen vähintään 63 % nestekiertoisissa LTO-järjestelmissä ja 67 % muissa LTO-järjestelmissä. 1.1.2018 alkaen vaatimukset kiristyvät edelleen ja lämpötilahyötysuhteen tulee olla nestekiertoisissa LTO-järjestelmissä vähintään 68 % sekä muissa LTO-järjestelmissä 73 %. (Komission asetus (EU) N:o 1253/2014.)

Ekosuunnitteluasetuksen seurauksena ilmanvaihtokoneiden ja LTO-pattereiden kokoa on jouduttu kasvattamaan. Tämä ei ole energiatehokkuuden kannalta pelkästään hyvä asia, sillä turhan suurissa koneissa ilman nopeus LTO-patterissa ei ole lämmönsiirron kannalta ihanteellinen. Nestekiertoisissa järjestelmissä lämmönsiirrin tarvitsee tietyn miniminopeuden ilmalle, jotta lämmönsiirto patterin pinnasta ilmaan on tehokasta. Tämä tulee huomioida myös silloin, kun ilmavirtoja pienennetään tarpeenmukaisesti. LTO-pattereiden suurempi koko tarkoittaa myös ilma- ja nestepuolen painehäviöiden kasvamista, jolloin puhaltimien ja kiertopumppujen energiankulutus suurenee. (Retermia Oy 2016.)

Ekosuunnitteluasetuksen lämpötilahyötysuhdevaatimus on toteuduttava tilanteessa, jossa tulo- ja poistoilmavirrat ovat yhtä suuret, poisto- ja ulkoilman lämpötilaero on 20 astetta sekä lämmönsiirto on kuivaa, eli poistoilmassa ei tapahdu vesihöyryn kondensoitumista. Erityisesti ammattikeittiöiden kohdalla siis moni tekijä on epäselvä, ja asetuksen velvoittama lämpötilahyötysuhde ei olekaan sama asia, kuin valmistajien ilmoittama LTO-järjestelmän lämpötilahyötysuhde mitoitusilanteessa. Yksiselitteisen selvää ei ole kuuluvatko keittiöilmanvaihdon IV-koneet ekosuunnitteluasetuksen piiriin ollenkaan. Asetukseen tulisi tarkentaa, että millä ulkoilman lämpötilalla lämpötilahyötysuhdevaatimukset on laadittu ja mikä on vaatimustaso silloin, kun tulo- ja poistoilmavirrat eivät ole saman suuruiset. Lisäksi nestekiertoisten järjestelmien kohdalla tulisi tarkentaa millä kiertonesteen ominaisuuksilla lämpötilahyötysuhdevaatimukset on laadittu. (Retermia Oy 2015.)

Poistoilman lämpötila on rakennuksen sisäisistä lämpökuormista johtuen usein korkeampi, kuin tuloilman sisäänpuhalluslämpötila. Tällöin lämmöntalteenoton vuosihyötysuhde on parempi, kuin mitä lämpötilahyötysuhde antaa ymmärtää. Ammattikeittiöissä tämä lämpötilaero voi olla hyvinkin suuri. Tällaisissa tilanteissa korkeaan lämpötilahyötysuhteeseen pyrkiminen saattaa johtaa kokonaisuudeltaan epäedullisiin laitemitoituksiin. Ammattikeittiöissä ei juuri ole tilausta lämmöntalteenotolle, jonka lämpötilahyötysuhde on yli 60 %. (Castrén 2017.)

2.3.8 Tarpeenmukainen ilmanvaihto

Tarpeenmukaisella ilmanvaihdolla tarkoitetaan ammattikeittiöissä poistoilmavirran säätöä keittiölaitteiden todellisen käyttörytmin perusteella. Samanaikaisesti säädetään kor-

vausilmamäärää niin että ilmanvaihdon tasapaino säilyy. Tällä tavalla voidaan saavuttaa merkittävät säästöt lämmitys- ja sähköenergian kulutuksessa. Säästöpotentiaalin määrä riippuu suuresti keittiön käyttöprofiilista. Tyypillisesti keittiölaitteiden todellinen käyttöaika on alle 50 %, jolloin ilmanvaihdon lämmitysenergian kulutuksesta voidaan vähentää tarpeenmukaisella ilmanvaihdolla puolet. (Sandberg 2014, s. 518.)

Tarpeenmukainen ilmanvaihto voidaan toteuttaa moni-ilmavirtajärjestelmillä, jolloin ilmavirtaa muutetaan portaittain kahdelle tai useammalle teholle tai muuttuvailmavirtajärjestelmillä. Näissä järjestelmissä puhaltimien pyörimisnopeus on säädettävä. Muuttuvailmavirtaisessa järjestelmässä puhaltimien pyörimisnopeutta säädetään taajuusmuuttajalla tai EC-moottorin ohjausjännitettä muuttamalla. (Motiva Oy 2016b, s. 59.) Mikäli samat puhaltimet palvelevat useampia kohdepoistoja, säädetään ilmavirtoja huuva- tai huuvaryhmäkohtaisesti ilmavirtasäätimillä tai yksinkertaisemmissa järjestelmissä sulukupelleilla. (Schrock et al. 2012, s. 46).

Tarpeenmukaista ilmanvaihtoa ohjaa automatiikkajärjestelmä, joka seuraa keittiölaitteiden käyttöä ja säätää ilmavirrat sopiviksi tämän perusteella. Ammattikeittiössä keittiölaitteiden käyttöä voidaan arvioida seuraavan laisia strategioita käyttäen:

- keittiölaitteen energiankäytön seuranta
- poistoilman lämpötilan mittaus ja/tai poistoilman ja keittiöilman välisen lämpötilaeron mittaus
- infrapunavalon käyttö ruuanlaittoprosessissa syntyvien epäpuhtauksien tai höyryn aistimiseen, yhdistettynä poistoilman lämpötilan mittaukseen
- infrapunavalon käyttö keittiölaitteen pinnan lämpötilan aistimiseen, yhdistettynä poistoilman lämpötilan mittaukseen
- suora kommunikointi keittiölaitteen ohjaimen ja ilmanvaihdon säätölaitteen välillä. (Fisher ym. 2013, s. 48–49; Schrock ym. 2012, s. 36–37.)

Sensoreihin perustuvat menetelmät edellyttävät algoritmeja, joiden avulla automatiikka tunnistaa keittiölaitteen eri käyttötilat ja erottaa esimerkiksi laitteen valmiustilan varsinaisesta ruuanvalmistuksesta. Lämpötilan mittaukseen perustuvissa menetelmissä ilmavirtaa voidaan ohjata suuremmaksi joko poistoilman lämpötilalle määritetyn asetusarvon ylittyessä tai asetetun lämpötilakäyrän mukaan lämpötilaeron poistoilman ja keittiöilman välillä muuttuessa. (Schrock ym. 2012, s. 36–37.)

Verrattuna pelkkään lämpötilan mittaukseen, edistyneempiin aktiivisuuden seurantamenetelmiin perustuva ilmanvaihdon ohjaus voi reagoida nopeammin keittiössä tapahtuviin muutoksiin ja säätää ilmanvaihtoa tarkemmin. Tällöin minimi-ilmavirrat voidaan säätää pienemmiksi, ja ilmanvaihdon ohjauksella voidaan saada suurempia säästöjä. Kaikenlaisissa keittiöprosesseissa tästä ei kuitenkaan saada oleellista hyötyä. Tällaisia tapauksia voivat olla esimerkiksi sellaiset uunit, joissa ei synny juurikaan epäpuhtauksia ilmaan, laitteet, joissa ei ole lämpötilan säätöä tai prosessit, joissa vapautuu poistoilmaan suuri määrä lämpöä. Joissakin tapauksissa infrapunasensorit ovat kuitenkin välttämättömiä järjestelmän optimaalisen toiminnan kannalta. (Fisher ym. 2013, s. 49; Schrock ym. 2012, s. 44–46.)

Lämpötilan mittaukseen perustuvassa ohjauksessa reagointiaikaan vaikuttaa suuresti automatiikkaan määritetyt lämpötilan asetusarvot. Keittiön eri prosesseissa syntyy lämpöä eri tavalla, mikä pitää huomioida asetusarvojen valinnassa. Myös keittiöilman läm-

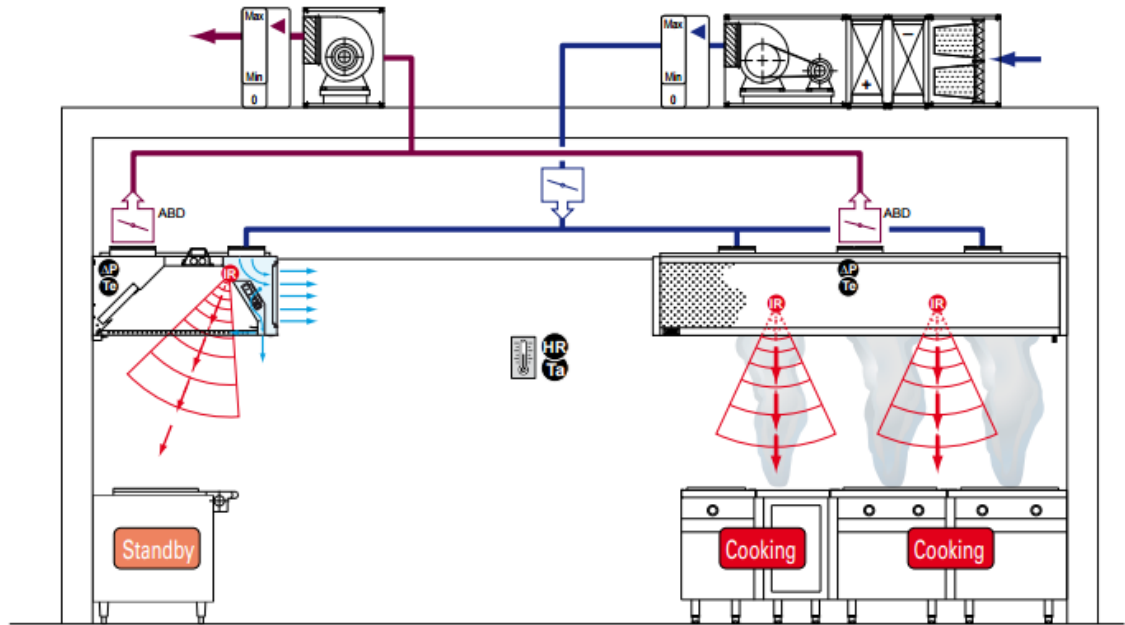
pötilä muuttuu vuodenaikojen mukaan, mikä vaikuttaa poistoilman lämpötilaan. Sopimattomasti säädetty järjestelmä ei välttämättä tunnista keittiön eri kuormitustasoja, jolloin se saattaa toimia jatkuvasti jollakin samalla ilmavirralla. Tällöin tavoiteltua energiansäästöä ei saavuteta tai vaihtoehtoisesti ilmanvaihdon tehokkuus ei ole riittävä kaikilla hetkillä. (Schrock ym. 2012, s. 44–46.)

Kun ohjataan ilmanvaihtoa tarpeenmukaisesti, on huolehdittava siitä, että epäpuhtauksien sieppaus- ja erotusteho säilyy huuvin ilmavirran ollessa suunniteltua maksimi-ilmavirtaa pienempi. Järjestelmän kaikki komponentit tulee valita niin, että järjestelmä toimii vakaasti kaikilla ilmavirroilla. (American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers 2011, s. 33.2.)

Tarpeenmukaisesta ilmanvaihtojärjestelmästä saatava kustannushyöty riippuu suuresti järjestelmän koosta ja keittiön ilmanvaihtomäärästä. Kehittyneemmät systeemit, kuten infrapunasensoreihin perustuvat systeemit, ovat investointina kalliimpia kuin pelkkään lämpötilanmittaukseen perustuvat. Lisäksi tarpeenmukaisella ilmanvaihdon ohjauksella saavutettava hyöty riippuu muun muassa tuloilman lämmitys- ja jäähdytystarpeesta, keittiön käyttöprofiilista sekä ilmanvaihtojärjestelmän vuorovaikutuksesta keittiön muun LVI-järjestelmän kanssa. (Fisher ym. 2013, s. 49.)

Esimerkkinä tarpeenmukaisesta ilmanvaihtojärjestelmästä voidaan mainita Halton M.A.R.V.E.L. (Model-based Automated Regulation of Ventilation Exhaust Levels) -järjestelmä. Järjestelmässä huuviin asennetut infrapunasäteilytunnistimet seuraavat kunkin laitteen pintalämpötilan muutosta. Tämän ja lämpötilan mittauksen perusteella automatiikka tunnistaa seuraavat käyttötilat: virta katkaistu, lämmitys kypsennyslämpötilaan sekä kuuma (kypsennys käynnissä). Huuvun säätölaite ohjaa tunnistimia ja huuvaan integroitua ilmavirtasäädintä sekä mittaa poistoilmavirtaa. Tietokoneohjattu järjestelmä kerää tietoja huuvin säätölaitteista ja ohjaa niiden perusteella puhaltimia ja poistoimureita. Se ohjaa myös automaattista kalibrointia ja säätää puhaltimen paineen. Lisäksi järjestelmä mittaa poistoilman lämpötilaa sekä huonelämpötilaa ja kosteutta, joille käyttäjä voi asettaa tavoitearvot. (Halton Oy 2017.)

Kuvassa 4 on esitetty Halton M.A.R.V.E.L. -järjestelmän toiminta, kun keittiö on käytössä. Kuvan tilanteessa useimmat laitteet ovat kypsennystilassa ja osa valmiustilassa. Järjestelmän infrapunatunnistimet havaitsevat laitteiden tilassa tapahtuvat muutokset, ja kunkin huuvun poistoilmavirta mukautetaan automaattisesti reaaliajassa olosuhteissa tapahtuneisiin muutoksiin.



Kuva 4. Halton M.A.R.V.E.L. -järjestelmän toiminta, kun keittiö on käytössä. (Halton Oy 2017.)

3 Tutkimuksen kohdekeittiöt

3.1 Keittiöiden esittely

Tässä kappaleessa esitellään tutkimuksen kohteena olevat kolme keittiötä. Kukin näistä on olemassa oleva keittiö, jonka keittiölaitteita, geometriaa ja käyttöprofiilia hyödynnetään saatujen tietojen mukaan keittiöiden mallinnuksessa. Työssä käytetään myös keittiöille alun perin suunniteltuja mitoitusilmavirtoja. Nämä ilmavirrat on mitoitettu keittiölaitteiden sähkötehojen ja laitekohtaisten mitoituspoistoilmavirtojen perusteella, eikä esimerkiksi kappaleessa 2.3.6 esiteltyä VDI 2052 -standardia ole käytetty.

Lämpö- ja kosteuskuormien osalta on työssä huomioitu keittiölaitteet, valaistus sekä tilassa työskentelevät ihmiset. Näistä keittiölaitteiden aiheuttamalla lämpökuormilla on selvästi suurin vaikutus tarvittavaan ilmanvaihtoon. Laitekohtaiset lämpö- ja kosteuskuormat on määritetty VDI 2052 (Verein deutscher ingenieure 2006) -standardin taulukon sekä laitteiden sähkötehon perusteella. Astianpesukoneita on verrattu liitântätehon perusteella Metoksen vastaaviin malleihin, ja tilaan aiheutuvat lämpö- ja kosteuskuormat on määritetty näiden koneiden teknisten tietojen perusteella (Värpiö 2017). Keittiöiden lämpö- ja kosteuskuormat on esitetty laite- ja huuvakohtaisesti liitteessä 1.

3.2 Keittiö 1. Koulun valmistuskeittiö

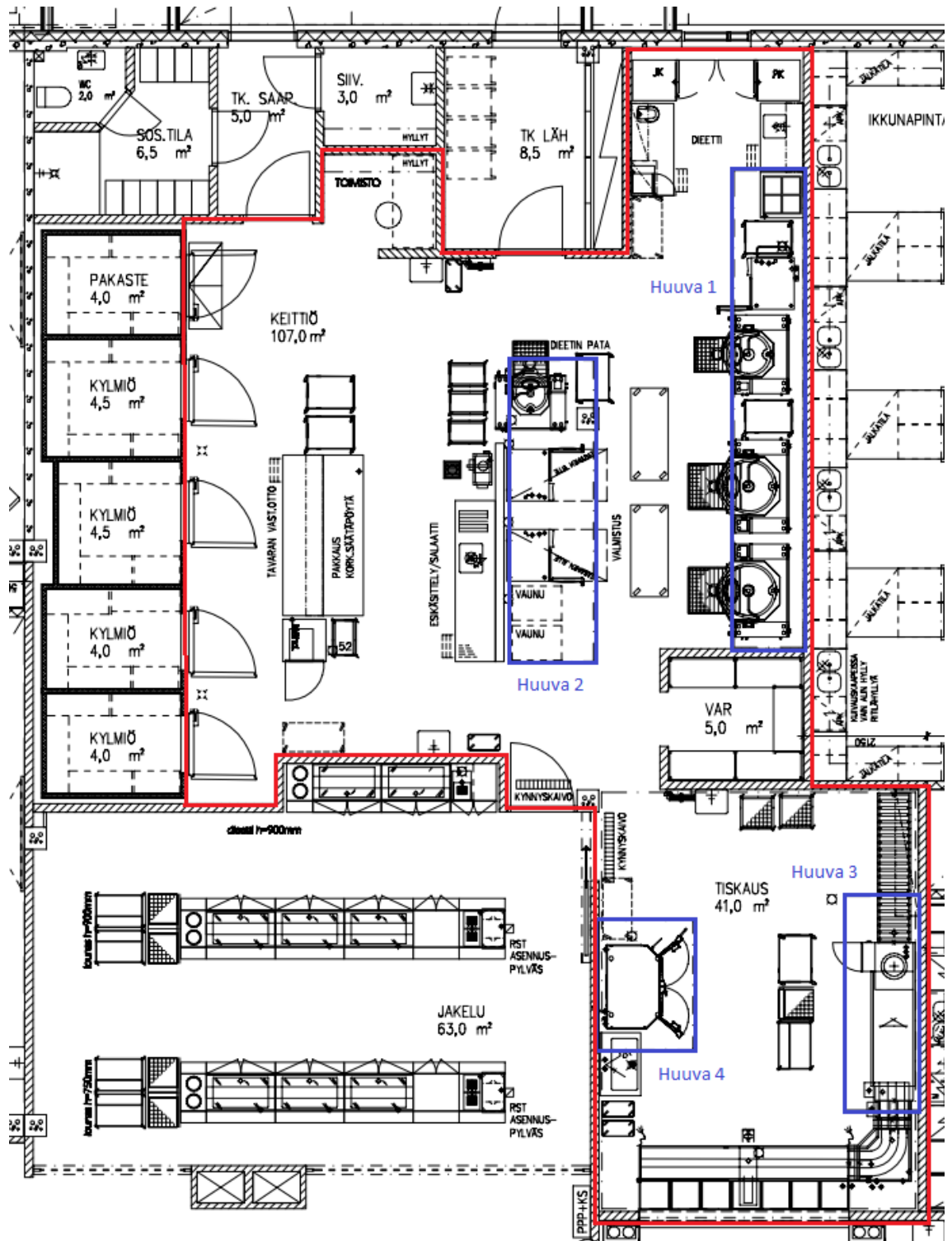
3.2.1 Tietoja keittiöstä ja sen käytöstä

Koulun valmistuskeittiössä valmistetaan vuorokaudessa 1500–2000 annosta, joista 600–1100 annosta viedään talon ulkopuolelle. Keittiön yhteydessä olevaan ruokasaliin mahtuu 920 henkilöä, ja lisäksi annoksia viedään samassa rakennuksessa sijaitseviin päiväkotiryhmiin.

Tutkimuksen kohteena oleva alue on pinta-alaltaan 153 m². Tähän kuuluu varsinaisen ruuanvalmistusalueen lisäksi keittiön yhteydessä oleva 41 m²:n tiskausalue ja avoin kuiva-ainearasto. Tilojen korkeus on 2,6 m.

Keittiö on toiminnassa arkipäivinä syyskuun alusta toukokuun loppuun. Näinä päivinä keittiössä työskentelee kuusi henkilöä kello 6:n ja 15:n välisenä aikana. Kaikki ruoka valmistetaan keittiössä aamun ja aamupäivän aikana, sillä talon ulkopuolelle toimitettavia ruokia ei jäädytetä. Ruuanlaitto aloitetaan aamulla noin klo 7 ja se jatkuu puoleen päivään asti. Lounas on tarjolla koululla klo 10.30–12.

Kuvassa 5 on esitetty keittiön koulun valmistuskeittiön pohjakuva. Kuvassa on esitetty punaisella tutkittavan tilan rajat ja sinisellä kohdepoistoon tarkoitettut huuvat.



Kuva 5. Koulun valmistuskeittiön pohjakuva.

3.2.2 Keittiön laiteluettelo ja ilmvirtalaskelmat

Keittiön poistoilmavirtojen mitoitus on perustunut keittiölaitteiden sähkötehoon ja ohjekortissa LVI06-10304 Ammattikeittiöiden sisäilmaston suunnittelu (2000) esitettyihin keittiölaitekohtaisiin mitoituspoistoilmavirtoihin. Taulukossa 3 on esitetty huuvakohtaisesti keittiön laitteet, näiden liitännät, keittiölaitekohtaiset mitoitusilmavirrat ja keittiössä toteutetut mitoitusilmavirrat kullekin huuvalle. Tämän lisäksi taulukossa on esi-

tetty kohdepoistojen eli huuviin yhteispoistoilmamäärä sekä yleispoiston ilmamäärä, joka kattaa noin 10 % keittiön kokonaispoistoilmavirrasta.

Taulukko 3. Koulun valmistuskeittiön laitteet sekä poistoilmavirtojen mitoitus.

lkm	Laite	Sähköteho (kW)	Mitoitusilmavirta (dm ³ /s/kW)	Ilmavirta (dm ³ /s)
Huuva 1, padat				
1	Keittiöpata	40	10	400
2	Keittiöpata	52,2	10	1044
1	Induktioliesi	20	20	400
Huuvan mitoitusilmavirta				1500
Huuva 2, uunit				
1	Yhdistelmäuuni	34,5	10	345
2	Yhdistelmäuuni	49	10	980
1	Keittiöpata (dieetti)	20	10	200
Huuvan mitoitusilmavirta				1100
Huuva 3, astioiden pesu				
1	Astienpesukone, tunneli	31,8	15	500
Huuvan mitoitusilmavirta				500
Huuva 4, patapesu				
1	Astianpesukone, pata	21	20	400
Huuvan mitoitusilmavirta				400
Kohdepoistot yhteensä				3500
Yleispoisto				300

3.2.3 Keittiön lämpö- ja kosteuskuormat

Keittiön lämpö- ja kosteuskuormat on esitetty keittiölaitekohtaisesti liitteessä 1. Työssä tarkastellaan keittiön lämpö- ja kosteuskuormia sekä ilmanvaihtoa tilakohtaisesti. Tällöin voidaan laskea laitteista aiheutuvat kuormat yhteen ja tarkastella näitä ajasta riippuvaisena. Valmistuskeittiössä kaikista laitteista aiheutuva maksimaalinen tuntuva lämpökuorma on yhteensä 33,7 kW. Todellisuudessa keittiön kaikki laitteet eivät kuitenkaan ole samaan aikaan päällä täydellä teholla, eikä keittiöön kohdistuva lämpökuorma ole millään hetkellä näin suuri.

Valaistus- ja henkilökuormat kohdistuvat keittiöön samanaikaisesti henkilökunnan työpäivän ajan. Ruuanvalmistus aloitetaan ennen kello seitsemää, joten laitteiden käyttö aloitetaan klo 6.30 esilämmityksellä. Uunien ja patojen käyttöasteet riippuvat päivästä ja valmistettavasta ruuasta, ja yleensä kaikki nämä laitteet eivät ole päällä samanaikaisesti. Koulun ulkopuolelle toimitettavat ruuat ovat valmiita klo 10:een mennessä jolloin laitteiden käyttöaste pienenee vielä hieman. Astianpesu aloitetaan puoli kymmeneltä ja lounasaikaan astianpesukone on käytössä koko ajan. Patapesukonetta käytetään aamun ja aamupäivän aikana silloin tällöin. Keittiön käyttöprofiilin perusteella määritetyt lämpökuormat puolen tunnin keskiarvotehoina on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Valmistuskeittiön yhteenlaskettu tuntuva lämpökuorma, puolen tunnin keskiarvoteho.

Aika	Lämpökuorma (kW)
6-6:30	0
6:30-7	9,2
7-7:30	18,5
7:30-8	18,5
8-8:30	18,5
8:30-9	19,6
9-9:30	19,6
9:30-10	23,1
10-10:30	23,1
10:30-11	19,7
11-11:30	19,7
11:30-12	19,7
12-12:30	19,7
12:30-13	19,7
13-13:30	7,0
13:30-14	3,5
14-14:30	0
14:30-15	0

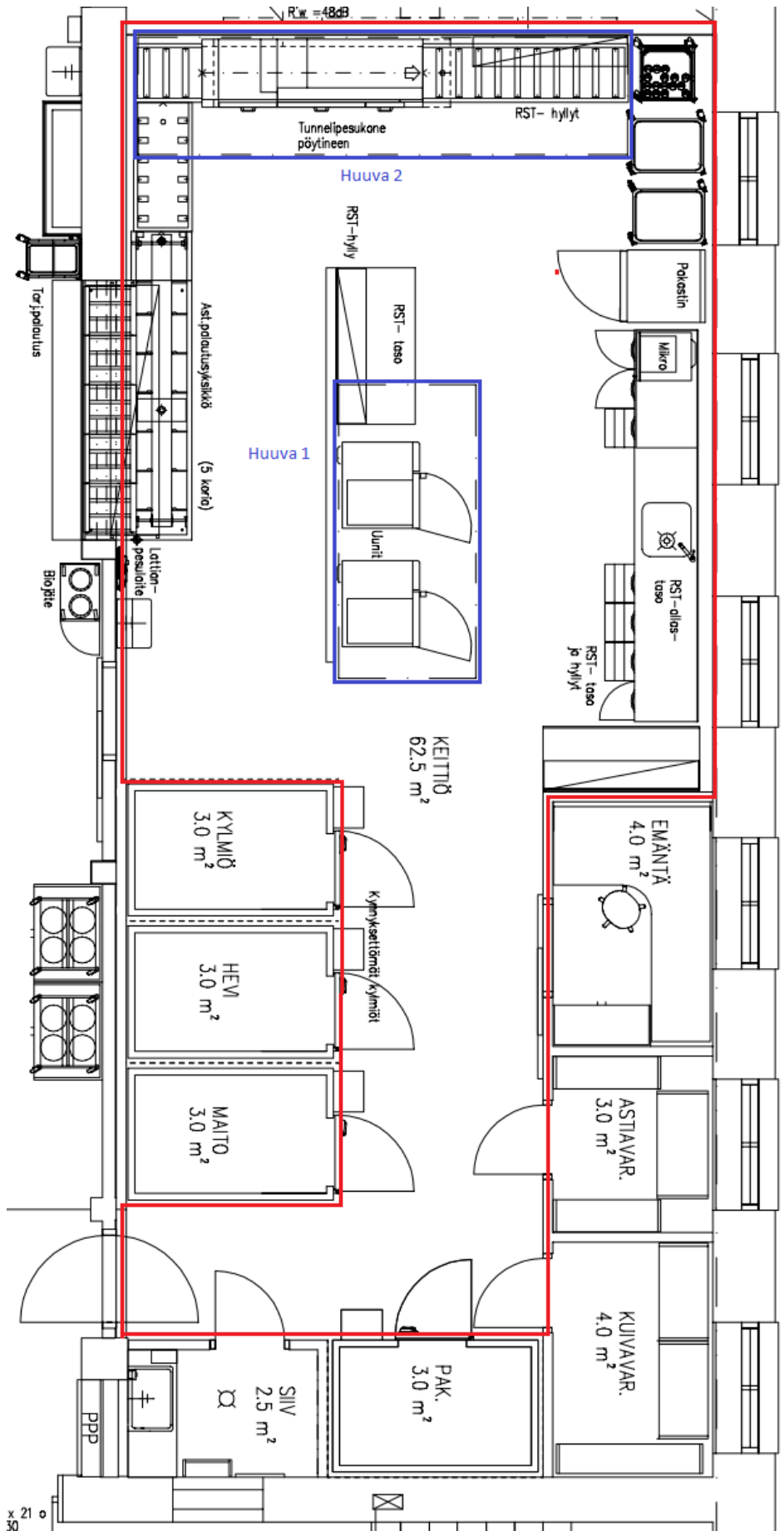
Keittiölaitteista aiheutuu kosteuskuormaa samanaikaisesti lämpökuorman kanssa. Kosteuskuormalle on laadittu aikataulu lämpökuorman kanssa vastaavalla tavalla keittiön käyttöprofiilin, laitteiden liitântätehon ja VDI 2052 -standardin (2006) taulukon perusteella. Kosteuskuormaa ei kuitenkaan mallinneta lämpökuormien tavoin tuntitasolla vaan keittiön käyttötuntien keskiarvona. Lämpökuormien kanssa samanaikaisesti vaikuttava kosteuskuorma on keskimäärin 62,8 kg/h.

3.3 Keittiö 2. Koulun lämmityskeittiö

3.3.1 Tietoja keittiöstä ja sen käytöstä

Koulun lämmityskeittiössä ei ole varsinaista lämpimän ruuan valmistusta, vaan lounas tuodaan muualta ja se lämmitetään keittiön kahdessa yhdistelmäuunissa. Keittiössä työskennellään arkipäivinä syyskuun alusta toukokuun loppuun. Näinä aikoina lounaita tarjotaan päivittäin noin 400, ja keittiössä työskentelee 3 henkilöä klo 7:n ja 15:n välisenä aikana. Keittiön yhdistelmäuunit ovat päällä tarpeen mukaan; tyypillinen käyttöaika on klo 8-11.30. Astianpesukonetta käytetään 10:n ja 13.30:n välillä.

Keittiön pinta-ala on 62,5 m² ja korkeus 2,4 m. Samassa tilassa sijaitsee myös astianpesulaitteisto. Keittiön yhteydessä olevaan ruokasaliin mahtuu 164 henkilöä. Keittiön pohjakuvassa (kuva 6) on esitetty punaisella tutkittavan tilan rajat ja sinisellä kohdepoistoon tarkoitetut huuvut.



Kuva 6. Koulun lämmityskeittiön pohjakuva.

3.3.2 Keittiön laiteluettelo ja ilmvirtalaskelmat

Keittiön poistoilmavirtojen mitoitus on perustunut keittiölaitteiden sähkötehoon ja ohjekortissa LVI06-10304 Ammattikeittiöiden sisäilmaston suunnittelu (2000) esitettyihin keittiölaitekohtaisiin mitoituspoistoilmavirtoihin. Taulukossa 5 on esitetty huuva-kohtaisesti keittiön laitteet, näiden sähkötehot, keittiölaitekohtaiset mitoitusilmavirrat ja kullekin huuvalle toteutetut mitoitusilmavirrat. Yleispoisto kattaa 10 % keittiön kokonaispoistoilmavirrasta.

Taulukko 5. Koulun lämmityskeittiön laitteet sekä poistoilmavirtojen mitoitus.

lkm	Laite	Sähköteho (kW)	Mitoitusilmavirta (dm ³ /s/kW)	Ilmavirta (dm ³ /s)
Huuva 1, uunit				
1	Yhdistelmäuuni	19	10	190
1	Yhdistelmäuuni	21	10	210
Huuvan mitoitusilmavirta				400
Huuva 2, astianpesu				
1	Astianpesukone	40	15	600
Huuvan mitoitusilmavirta				500
Kohdepoistot yhteensä				900
Yleispoisto				100

3.3.3 Keittiön lämpö- ja kosteuskuormat

Työssä tarkastellaan myös lämmityskeittiön lämpö- ja kosteuskuormia sekä ilmanvaihtoa tilakohtaisesti, jolloin voidaan laskea laitteista aiheutuvat kuormat yhteen ja tarkastella näitä ajasta riippuvaisena. Lämmityskeittiössä kaikista laitteista aiheutuva tuntuva lämpökuorma on yhteensä maksimissaan 8,7 kW.

Keittiössä työskennellään koulupäivinä kello 7:n ja 15:n välisenä aikana. Valaistus- ja henkilökuormat kohdistuvat keittiöön tänä aikana. Ruuanvalmistus aloitetaan ennen kello kahdeksaa, joten uunien käyttö aloitetaan klo 7.30 esilämmityksellä. Astianpesu aloitetaan noin klo 10 ja astianpesukone on käytössä lähes jatkuvasti klo 13.30:een asti. Keittiön käyttöprofiilin perusteella määritetyt lämpökuormat puolen tunnin keskiarvototehoina on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6. Lämmityskeittiön yhteenlaskettu tuntuva lämpökuorma, puolen tunnin keskiarvoteho.

Aika	Lämpökuorma (kW)
7-7:30	0
7:30-8	2,4
8-8:30	4,8
8:30-9	4,8
9-9:30	4,8
9:30-10	4,8
10-10:30	6,8
10:30-11	8,7
11-11:30	8,7
11:30-12	6,3
12-12:30	3,9
12:30-13	3,9
13-13:30	3,9
13:30-14	2,0
14-14:30	0
14:30-15	0

Kosteuskuormalle on laadittu aikataulu lämpökuorman kanssa vastaavalla tavalla. Myös lämmityskeittiön osalta kosteuskuormat mallinnetaan keittiön käyttötuntien keskiarvona. Aikataulun mukaan kosteuskuorma on lämmityskeittiössä klo 7.30:n ja 14:n välisenä aikana keskimäärin 8,4 kg/h.

3.4 Keittiö 3. Liikenneaseman keittiö

3.4.1 Tietoja keittiöstä ja sen käytöstä

Liikenneaseman keittiö poikkeaa edellisistä keittiöistä sekä ruuanlaittoprosesseiltaan, että käyttöajoiltaan. Keittiö on avoinna joka päivä vuorokauden ympäri. Keittiössä valmistetaan aukioloaikoina á la carte – annoksia, ja lisäksi ravintolassa on tarjolla päivittäin vitriinituotteita sekä noutopöydästä aamiainen klo 6-10 ja lounas klo 10.30–14. Aamiaisella on tarjolla myös lämpimiä ruokia, kuten puuroa, munakasta ja lihapullia. Liikenneasemalla on myös vuorokauden ympäri palveleva hampurilaisravintola, jonka ruoka valmistetaan tilausten mukaan samassa keittiössä. Edellisistä esimerkeistä poiketen, keittiössä on paljon paistamista, jolloin ruuanlaitosta vapautuu ilmaan enemmän hajuja ja epäpuhtauksia.

Keittiön pinta-ala on yhteensä 125 m², ja tilan korkeus on 2,7 m. Tähän kuuluu astianpesuun tarkoitettu tila. Liikenneaseman ravintolassa on 200 asiakaspaikkaa. Työntekijöitä keittiössä on 1-5, riippuen vuorokaudenajasta. Keittiön pohjakuvassa (kuva 7) on esitetty punaisella tutkittavan tilan rajat ja sinisellä kohdepoistoon tarkoitetut huuvut.

3.4.2 Keittiön laiteluettelo ja ilmvirtalaskelmat

Keittiön poistoilmavirtojen mitoitus on perustunut keittiölaitteiden sähkötehoon ja ohjekortissa LVI06-10304 Ammattikeittiöiden sisäilmaston suunnittelu (2000) esitettyihin keittiölaitekohtaisiin mitoituspoistoilmavirtoihin. Taulukossa 7 on esitetty huuvakohtaisesti keittiön laitteet, näiden liitännät, keittiölaitekohtaiset mitoitusilmavirrat ja kullekin huuvalle toteutetut mitoitusilmavirrat. Yleispoisto kattaa noin 10 % keittiön kokonaispoistoilmavirrasta.

Taulukko 7. Liikenneaseman keittiön laitteet sekä poistoilmavirtojen mitoitus.

lkm	Laite	Sähköteho (kW)	Mitoitusilmavirta (dm ³ /s/kW)	Ilmavirta (dm ³ /s)
Huuva 1, astioiden pesu				
1	Astianpesukone, korikuljetin	39	15	585
Huuvan mitoitusilmavirta				500
Huuva 2, patapesu				
1	Astianpesukone, pata	12,5	20	250
Huuvan mitoitusilmavirta				300
Huuva 3, á la carte				
1	Pizzauuni	12,3	15	185
1	Paistotaso	12	30	360
2	Rasvakeitin	7,5	25	375
1	Induktioliesi	7,5	20	150
Huuvan mitoitusilmavirta				1000
Huuva 4, lounasvalmistus				
1	Keittiöpata	16	10	160
1	Induktioliesi	7,5	20	150
2	Yhdistelmäuuni	17,5	10	350
Huuvan mitoitusilmavirta				700
Huuva 5, bake-off paisto				
1	Bake-off uuni	6,5	10	65
Huuvan mitoitusilmavirta				100
Huuva 6, burger peruna-asema				
1	Automaattirasvakeitin	17,5	25	438
Huuvan mitoitusilmavirta				400
Huuva 7, burger				
2	Puoliautomaattiparila	6,5	30	390
Huuvan mitoitusilmavirta				400
Kohdepoistot yhteensä				3400
Yleispoisto				400

3.4.3 Keittiön lämpö- ja kosteuskuormat

Myös liikenneaseman keittiön lämpö- ja kosteuskuormia sekä ilmanvaihtoa tarkastellaan tilakohtaisesti. Kaikista laitteista aiheutuva tuntuva lämpökuorma on tässä keittiössä yhteensä maksimissaan 32,5 kW.

Tämän tyyppisessä keittiössä laitteiden käyttöaste voi vaihdella merkittävästi liikenneaseman asiakasmäärien mukaan. Asiakasmäärät taas ovat riippuvaisia esimerkiksi lii-

kenneaseman sijainnista sekä ajankohdasta. Työssä liikenneaseman lämpökuormat on mallinnettu tunneittain sen mukaan, millainen käyttöprofiili voisi olla tyypillinen tämän kaltaiselle keittiölle. Nämä lämpökuormat on esitetty taulukossa 8.

Taulukko 8. Liikenneaseman keittiön yhteenlaskettu tuntuva lämpökuorma, tunnin keskiarvoteho.

Aika	Lämpökuorma (kW)
0-1	2,5
1-2	2,5
2-3	2,5
3-4	2,5
4-5	4,0
5-6	10,0
6-7	13,5
7-8	11,5
8-9	8,8
9-10	12,5
10-11	13,4
11-12	16,1
12-13	16,1
13-14	11,8
14-15	18,5
15-16	17,8
16-17	16,4
17-18	15,5
18-19	15,5
19-20	15,5
20-21	15,5
21-22	3,2
22-23	3,2
23-24	2,5

Kosteuskuormalle on laadittu aikataulu lämpökuorman kanssa vastaavasti. Kosteuskuorma mallinnetaan liikenneaseman keittiössä keskiarvona muiden keittiöiden tapaan. Kosteuskuorma on liikenneaseman keittiössä keskimäärin 24,3 kg/h.

4 Energiasimulointiin perustuva monitavoiteoptimointi

4.1 Tutkimusmenetelmä ja tutkimuksen tavoite

Optimointi tarkoittaa parhaan ratkaisun etsimistä. Rakennusten suunnittelussa myös LVI-tekniikan osalta pyritään löytämään asiakkaiden tarpeet täyttävät parhaat ratkaisut, mikä edellyttää vaihtoehtojen vertailua. Perinteisesti vertailu tehdään laskemalla ja simuloimalla muutama erilainen vaihtoehto ja valitsemalla näistä paras. Kokenut suunnittelija voi päästä näinkin hyvään lopputulokseen, mutta mikäli vertailu halutaan tehdä perusteellisesti tutkimalla useiden kymmenien tai satojen muuttujien vaikutusta lopputulokseen, ei tämä perinteinen lähestymistapa ole enää käytännössä mahdollinen. Ratkaisu tähän on simuloinnin ja optimoinnin yhdistäminen työkaluksi vaihtoehtojen vertailuun. Tätä menetelmää kutsutaan simulointiin perustuvaksi optimoinniksi. Energiategohkuusvaatimusten kiristyessä tällaiset simulointiin perustuvat optimointityökalut ovat tehokkaita apukeinoja rakennusten suunnitteluun. (Sirén 2015a, s. 3; Nguyen et al. 2013.)

Tämän työn tutkimusmenetelmänä käytetään energiasimulointiin perustuvaa monitavoiteoptimointia. Monitavoiteoptimointia esitellään tarkemmin seuraavassa kappaleessa. Analyysin tavoitteena on selvittää edellisessä kappaleessa esitellyille ammattikeittiöille elinkaarikustannuksiltaan optimaaliset ilmanvaihtoratkaisut. Analyysissa tarkastellaan lämmöntalteenoton ja tarpeenmukaisen ilmanvaihdon käyttöä osana ilmanvaihtojärjestelmää.

Tutkimuksen kohteena olevien keittiöiden laitteistot sekä ilmanvaihtojärjestelmät mallinnetaan, ja keittiön ilmanvaihdon vuositason energiankulutus määritetään simuloimalla kunkin keittiön käyttöprofiilin perusteella. Elinkaarikustannuksissa huomioidaan investointikustannukset ja ostoenergian tarve, jotka ovat monitavoiteoptimoinnin minivoitavat kohdefunktiot. Investointikustannuksissa huomioidaan vaihtoehtojen vertailun kannalta oleelliset ilmastointijärjestelmän hankinta- ja asennuskustannukset sekä lisäksi järjestelmien huolto- ja puhdistuskustannukset. Ilmanvaihtojärjestelmän ostoenergian tarve muodostuu järjestelmän sähköenergian sekä tuloilman lämmitysenergian kulutuksesta.

4.2 Monitavoiteoptimointi

Optimoinnin tavoitteet määritetään kohdefunktioita käyttäen. Optimointiprosessia, jossa on enemmän kuin yksi tavoite, kutsutaan monitavoiteoptimoinniksi. Käytännössä rakennusten energiaoptimoinnin ongelmat vaativat useimmiten monitavoitteista lähestymistapaa, sillä vain yhden tavoitteen mukaan optimointi ei yleensä johtaisi käytännössä toimivaan ratkaisuun. Tällöin on järkevintä asettaa vähintään kaksi toisistaan ristiriidassa olevaa tavoitetta ja hakea näille erilaisia kompromissiratkaisuja. Esimerkiksi energiainvestointeja arvioitaessa kannattaa asettaa tavoitteeksi sekä ostoenergian tarpeen, että investointikustannusten minimointi. Kun optimoidaan ainoastaan investointikustannuksia tai käyttökustannuksia, saadaan lopputulokseksi huonolaatuinen ratkaisu, jolla on suuret käyttökustannukset tai päinvastaisessa tapauksessa erittäin suuret investointikustannukset. Kun tavoitteita on useampia, löydetään optimoinnilla useita ominaisuuksiltaan erilaisia, mutta teoriassa samanarvoisia ratkaisuja. (Sirén 2015a, s. 26.)

Optimoinnin tarkoituksena on löytää kohdefunktioille optimiarvo, eli tapauksesta riippuen minimi tai maksimi. Useimmiten optimoinnilla tavoiteltu ääriarvo on minimi. Lisäksi optimointiongelmia rajataan rajoitusfunktioilla. Kohdefunktioiden arvon määrittävät päätösmuuttujat, joille haetaan optimoinnilla sellaiset arvot, että kohdefunktiot saavat optimiarvonsa kaikkien rajoitusfunktioiden täyttyessä samanaikaisesti. Päätösmuuttujia voi olla yksi tai useampia. Päätösmuuttujat voivat olla jatkuvia tai diskreettejä, ja kaikki päätösmuuttujat yhdessä muodostavat kohdefunktion ratkaisuväliavaruuden. Optimointiongelman formaali määrittely esitetään kaavoissa 6-9:

$$\text{Min}\{F(x)\} \quad (6)$$

siten että

$$G_i(x) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

$$H_i(x) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, p \quad (8)$$

missä

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \quad (9)$$

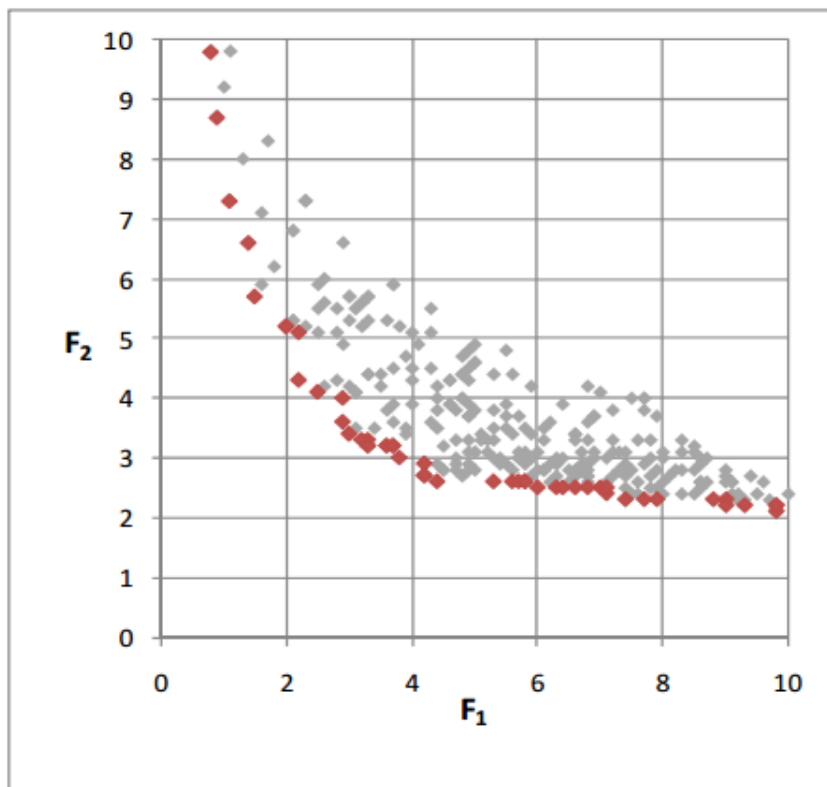
Näissä kaavoissa funktio $F(x)$ esittää kohdefunktioita, joita voi olla yksi tai monitavoiteoptimoinnin tapauksessa useampia. Kohdefunktiolle etsitään tässä siis minimiä. Funktiot G_i ja H_i ovat rajoitefunktioita, joita voidaan asettaa kuinka monta tahansa. Ne voivat olla niin kutsuttuja yhtälörajoitteita (G_i) tai epäyhtälörajoitteita (H_i). Optimointiongelman päätösmuuttujia kuvaa muuttujavektori x . Päätösmuuttujat ovat siis ne muuttujat, joiden parasta yhdistelmää optimoinnilla etsitään. (Sirén 2015a, s. 3-4.)

Kun tutkitaan esimerkiksi rakennuksen energiankulutusta, muodostettavat kohdefunktiot ovat lähes aina epälineaarisia tai muuten erittäin monimutkaisia, jolloin funktioiden ääriarvoja ei löydetä niiden derivaattaa tutkimalla. Myös asetetut rajoitefunktiot monimutkaistavat optimointia. Tällaisissa tapauksissa funktion arvoja voidaan tarkastella ainoastaan yhdessä pisteessä kerrallaan, ja kun optimoidaan esimerkiksi useita rakenteellisia ratkaisuja samanaikaisesti, päätösmuuttujat voivat saada jopa miljoonia erilaisia variaatioita. Tällöin optimointiin tarvitaan jokin ohjelmisto ja ratkaisualgoritmi.

Kohdefunktioilla voi olla yksi tai useampia minimi- ja maksimikohtia. Kohtia, jossa funktio saa koko ratkaisuväliavaruuden pienimmän arvonsa kutsutaan globaaliksi minimiksi. Muut mahdolliset minimikohdat ovat lokaaleja minimejä ja ne ovat funktion pienimpiä arvoja vain jollakin tietyllä välillä. Optimoinnissa voidaan päätyä joskus tahattomasti lokaaleihin minimeihin, mistä johtuen on tärkeää erottaa lokaalit minimi globaaleista. (Sirén 2015a, s. 6-7.)

Kun optimoinnilla on useampi tavoite, jotka ovat toisistaan ristiriidassa, optimin määrittely vaikeutuu. Määrittelyn helpottamiseksi on olemassa termi pareto-dominanssi. Kun kohdefunktioita pyritään minimoimaan, pareto-dominanssi määritellään siten, että dominoivan ratkaisun kaikkien kohdefunktioiden arvot ovat pienemmät tai yhtä suuret ja ainakin yksi arvo aidosti pienempi, kuin siihen verrattavan ratkaisun arvot. Pareto-optimaalisia ratkaisuja ovat sellaiset, joita mikään muut ratkaisu ei dominoi. Tällaisen ratkaisun kohdefunktion arvoa ei voi pienentää ilman, että toisen kohdefunktion arvo suurenee. Monitavoiteoptimoinnista saadaan vastaukseksi joukko tällaisia ratkaisuja, jotka ovat kaikki tavallaan optimaalisia. Tätä pareto-optimaalisten ratkaisujen joukkoa kutsutaan pareto-optimaaliseksi joukoksi. (Sirén 2015a, s. 26–29; Caldas & Norford 2003.) Kuvassa 8 on esitetty kahden kohdefunktion optimointiongelman mahdolliset

ratkaisut. Pareto-rintaman muodostavat pareto-optimaaliset ratkaisut on esitetty punaisella.



Kuva 8. Kahden kohdefunktion optimointiongelman ratkaisut. (Sirén 2015a, s. 28.)

Pareto-optimaaliset ratkaisut ovat määrittelymielessä kaikki samanarvoisia. Näistä ratkaisuksista on kuitenkin jollakin perusteella valittava yksi. Sopivimman ratkaisun valintaan voi vaikuttaa esimerkiksi kohdefunktioiden eriarvoinen painotus tai eri ratkaisujen päätösmuuttujien arvot. (Sirén 2015a, s. 28–29.)

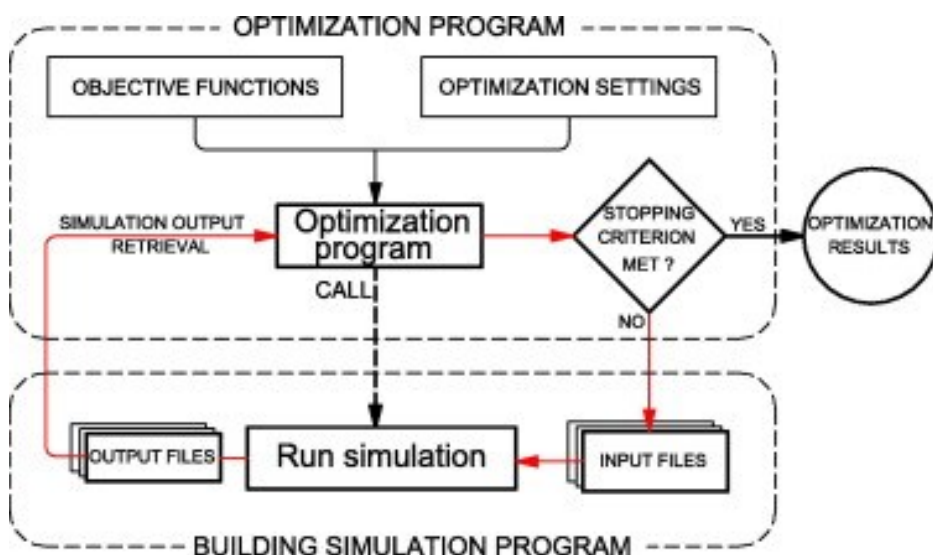
4.3 Simuloinnin ja optimoinnin yhdistäminen

Optimointiin on jo olemassa laaja valikoima erilaisia työkaluja, jotka sisältävät erilaisia optimointialgoritmeja. Algoritmeja on tarjolla esimerkiksi Matlab ja Excel -ohjelmistoihin. Esimerkkinä voidaan mainita myös MOBO (a Multi Objective Building Optimization tool), joka on Aalto-yliopiston ja Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:n kehittämä ohjelmisto rakennusten suorituskyvyn optimointiin. MOBO pystyy käsittelemään yksi- ja monitavoitteisia optimointiongelmia, joihin käyttäjä voi määritellä jatkuvia ja diskreettejä päätösmuuttujia sekä rajoitefunktioita. Se voidaan yhdistää moniin eri simulointiohjelmistoihin ja käytössä on erilaisia optimointialgoritmeja. (Sirén 2015a, s. 35.)

Rakennusten energiaoptimoinnissa simulointi ja optimointi voidaan yhdistää toimivaksi kokonaisuudeksi, joka pystyy seulomaan asetettujen tavoitteiden mukaan parhaita ratkaisuja miljoonien erilaisten vaihtoehtojen joukosta laskenta-ajan pysyessä kohtuullisena. Rakennusten energiasimulointi perustuu rakennuksen matemaattis-fysikaaliseen mallintamiseen. Simuloinnin päätavoitteena on selvittää rakennuksen energiantarve ja varmistaa sisäolosuhteiden pysyminen tavoitteenmukaisina. Kehittyneet mallit kuvaavat

rakennuksessa tapahtuvat ilmiöt ajasta riippuvina, ja yleensä simulointiohjelmisto käsittelee useiden mallien kokonaisuuden, jolla voidaan simuloida erilaisia asioita. Tällaisia asioita ovat muun muassa rakennuksen energia- ja lämpötekkinen käyttäytyminen, sisäilman epäpuhtauksien pitoisuudet ja leviäminen sekä valaistus, jotka kaikki vaativat oman mallinsa. Erikseen voidaan mallintaa myös talotekniset komponentit. (Sirén 2015a, s. 3-4.)

Simulointi voidaan yhdistää optimointialgoritmiin monella tavalla, mutta periaatteessa prosessi on aina samanlainen (kuva 9). Simulointi tuottaa energiankäyttöön ja sisäolosuhteisiin liittyvät tiedot ja energiankäytön perusteella lasketaan energiakustannukset tai esimerkiksi päästöt. Elinkaarikustannukset kootaan näiden tietojen ja optimointikierroksen päätösmuuttujien arvojen mukaan laskettujen investointikustannusten perusteella. Tämän jälkeen tarkistetaan onko asetettu lopettamiskriteeri täyttynyt. Mikäli ei ole, siirretään päätösmuuttujille lasketut arvot optimointialgoritmilta, joka pyrkii viemään ratkaisua lähemmäs optimiarvoa valitsemalla uudet päätösmuuttujat ja syöttämällä ne taas simulointiin. Laskenta kiertää tällä tavalla kunnes lopettamiskriteeri täyttyy. Tiedon vaihto simuloinnin ja optimoinnin välillä tapahtuu useimmiten kirjoittamalla tiedostoon ja lukemalla tiedostosta. (Sirén 2015a, s. 33–44.)



Kuva 9. Simuloinnin ja optimoinnin yhdistäminen. (Nguyen et al. 2013.)

4.4 Tutkimuksen optimointiongelman raja

Tämän tutkimuksen tavoitteena on määrittää kolmelle esimerkkikeittiölle kustannusoptimaaliset ratkaisut poistoilman lämmöntalteenoton ja tarpeenmukaisen ilmanvaihdon käytölle osana ilmanvaihtoa. Monitavoiteoptimoinnin kohdefunktiot ovat investointikustannukset ja vuosittaiset ostoenergiakustannukset, jotka pyritään työssä minimoimaan.

Optimoinnin päätösmuuttujat ovat lämmöntalteenoton toteutustapa sekä ilmanvaihdon ohjaustapa. Lämmöntalteenoton kohdalla tutkitaan lämmöntalteenoton kannattavuutta erilaisilla patterityypeillä ja ilmanvaihdon ohjauksen kohdalla sitä, kannattaako ilmanvaihto toteuttaa vakioilmavirtajärjestelmällä, muuttuvailmavirtajärjestelmällä vai tar-

peenmukaisesti Haltonin M.A.R.V.E.L. -järjestelmällä. Molemmat päätösmuuttujat ovat diskreettejä ja voivat saada seuraavia arvoja:

Lämmöntalteenoton (LTO:n) toteutus:

- 1) ei lämmöntalteenottoa
- 2) glykoli-LTO lamellipatterilla (Keittiö 1 ja 3) / ristivirta-LTO (Keittiö 2)
- 3) glykoli-LTO 3-rivisellä neulaputkipatterilla
- 4) glykoli-LTO 5-rivisellä neulaputkipatterilla
- 5) glykoli-LTO 6-rivisellä neulaputkipatterilla.

Ilmanvaihdon ohjaus:

- A) vakioilmavirtajärjestelmä, ei tarpeenmukaista ilmanvaihdon ohjausta
- B) muuttuvailmavirtajärjestelmä, ajastetusti porrastetut ilmavirrat ja huuvaryhmäkohtaiset sulkupellit
- C) muuttuvailmavirtajärjestelmä, tarpeenmukainen ilmanvaihdon ohjaus Halton M.A.R.V.E.L. -järjestelmällä

Tutkimukseen valituista päätösmuuttujista muodostuu erilaisia ratkaisuvaihtoehtoja kullekin keittiölle ainoastaan 15 (5 x 3) kappaletta. Tässä tapauksessa on mahdollista tutkia optimoinnin jokaista ratkaisuvaihtoehtoa erikseen ja määrittää sille kohdefunktioiden arvot. Tällöin varsinaiseen optimointiin ei tarvita erillistä algoritmia tai ohjelmistoa.

5 Keittiön ilmanvaihtojärjestelmän investointilaskelmat

5.1 Tutkimuksen investointilaskelmien metodiikka

Energiataloudellisten investointien kannattavuutta laskiessa tulee tarkastella hankkeen koko elinkaarta. Tällöin ei tarkastella pelkästään nykyhetkeä, vaan kulut, tuotot ja investoinnit sijoittuvat eri ajankohdille järjestelmän käyttöiän aikana. Korko vaikuttaa näiden pääomaerien suuruuteen, eikä tästä syystä pääomia voida sellaisenaan laskea yhteen. Pääomaerät voidaan siirtää vastaamaan samaa ajankohtaa käyttäen korko- ja diskonttaustekijöitä. (Sirén 2015b, s. 3.)

Korko määrittää pääoman arvon muutoksen ajan mukana. Kun käytetään nimellistä vuosikorkoa i , vuoden k lopussa pääoma on kasvanut kaavan 10 mukaisesti:

$$F_k = P(1 + i)^k = P s_{y,k} \quad (10)$$

Tekijää $s_{y,k}$ kutsutaan yksittäisen suorituksen korkotekijäksi. Korkotekijää siis käytetään, kun siirrytään ajassa eteenpäin.

Kun siirretään pääomaerä ajassa taaksepäin, on prosessi päinvastainen. Kun siirretään pääomanerä nykyhetkeen vuoden k lopusta, saa pääoma kaavan 11 mukaisen arvon:

$$P = \frac{F_k}{(1+i)^k} = F_k a_{y,k} \quad (11)$$

Tekijää $a_{y,k}$ kutsutaan yksittäisen suorituksen diskonttaustekijäksi ja pääomaerien siirtämistä taaksepäin kutsutaan diskonttaamiseksi.

Elinkaaritarkasteluissa jotkin kulut, esimerkiksi huoltokustannukset, toistuvat usein joka vuosi samansuuruisina. Tällaisten kulujen diskonttaukseen voidaan käyttää jaksollisten suoritusten diskonttaustekijää. Tämä lasketaan kaavan 12 mukaan:

$$a_n = \frac{1 - (1+i)^{-n}}{i} \quad (12)$$

missä a_n on jaksollisten suoritusten diskonttaustekijä
 n on tarkasteluajanjakson pituus vuosina

Nykyarvomenetelmässä kaikki kulut, tuotot ja investoinnit siirretään nykyhetkeen ja lasketaan yhteen. Lopputulokseksi saadaan hankkeen nykyarvo, jota kuvataan kustannusfunktiolla P (kaava 13):

$$P = \sum \text{tuotot} |_{t=0} - \sum \text{kulut} |_{t=0} - \sum \text{investoinnit} |_{t=0} + \text{jäännösarvo} |_{t=0} \quad (13)$$

(Sirén 2015b, s. 4.)

Soveltamalla diskonttausta vuoden n tarkasteluajalle, saadaan edellisen kaavan kustannusfunktio kaavan 14 muotoon:

$$P = \sum_{k=1}^n \frac{T_k}{(1+i)^k} - \sum_{k=1}^n \frac{K_k}{(1+i)^k} - I_0 + \frac{S}{(1+i)^n} \quad (14)$$

missä T_k on vuoden k tuotot
 K_k on vuoden k kulut
 I_0 on alkuinvestointi ensimmäisen vuoden alussa
 S on jäännösarvo vuoden n lopussa
 i on valittu laskentakorko

Yksinkertaistetusti voidaan sanoa, että hanke on kannattava, mikäli kustannusfunktio on positiivinen. Kustannusfunktion arvo kuitenkin riippuu käytetyistä korkotekijöistä. Jos kustannusfunktion arvo on negatiivinen, koron i kautta asetettu tuottovaatimus ei toteudu. Hanke saattaa kuitenkin olla tuottava, mutta vastaten pienempää tuottoa. Vastaavasti kustannusfunktion ollessa positiivinen asetettu tuottovaatimus ylittyy. Tällöin investointi tuottaa enemmän kuin laskentakoron kautta on asetettu vaatimukseksi. Mikäli kustannusfunktio saa negatiivisen arvon korolla $i = 0$, hanke on absoluuttisesti kannattamaton ja toteuttamiskelvoton. (Sirén 2015b, s. 12–13.)

Nykyarvomenetelmä on yksi käytetyimmistä menetelmistä investointien kannattavuuden arviointiin. Se huomioi rahan arvon riippuvuuden ajasta, ja tällä menetelmällä voidaan selvittää, toteutuuko investoinnille asetettu tuottovaatimus. Nykyarvomenetelmällä voidaan myös helposti vaihtoehtoisten energiainvestointien kannattavuutta. Suurimman nykyarvon antavaa vaihtoehtoa voidaan pitää edullisimpana. (Sirén 2015b, s. 13.)

Korko ilmaisee rahan arvon muuttumista ajan muuttuessa. Raha on sen käyttäjälle arvokkaampaa nyt kuin tulevaisuudessa. Kun korkokanta on korkea, painottuu nykyhetkellä ja lähitulevaisuudessa syntyvät kulut ja tuotot, ja alhaista korkokantaa käytettäessä erot nykyhetken ja tulevaisuuden välillä tasaantuvat. (Sirén 2015b, s. 19.)

Energiainvestointien kannattavuuslaskelmissa laskentakorkoon vaikuttaa kolme tekijää: nimelliskorko, inflaatio sekä energian hinnan inflaatio eli eskalaatio. Nimelliskorko ilmaisee investoinnille asetetun tuottovaatimuksen kannattavuuslaskelmia tehtäessä. Nimelliskorko voidaan määrittää erilaisilla perusteilla. Nimelliskorkona voidaan käyttää esimerkiksi lainan korkoa, bruttokansantuotteen kasvua tai se voidaan muodostaa kokemusperäisen arvion mukaan.

Inflaatio taas merkitsee yleistä kustannustason nousua, ja se pienentää rahan ostovoimaa siirryttäessä ajassa eteenpäin. Yleistä inflaatiota mitataan kuluttajahintaindeksillä ja sen muutoksilla. Reaalikorko yhdistää nimelliskoron ja inflaation vaikutuksen yhdeksi korkotekijäksi. Reaalikorko lasketaan kaavan 15 avulla:

$$r = \frac{i-f}{1+f} \quad (15)$$

missä i on nimelliskorko
 f on inflaation vaikutusta kuvaava korkotekijä

Yksittäisten tuotteiden ja hyödykkeiden, esimerkiksi energian, hintakehitys voi poiketa huomattavastikin inflaatiosta. Tällöin tämän hintaa tulee tarkastella erikseen ja käyttää termiä eskalaatio. Energian hinnan eskalaatio on suuri epävarmuustekijä energiainvestointien laskennassa, sillä tämän vaikutuksen arvioiminen on monimutkaista. Ener-

gian hintaan vaikuttaa kysynnän ja tarjonnan tasapaino, minkä lisäksi energiaa käytetään politiikan apuvälineenä. Energian tulevaa hintakehitystä voi arvioida ainoastaan aiemman hintakehityksen perusteella. Energian hinnan huomioiva reaalikorko lasketaan kaavan 16 mukaan:

$$r_e = \frac{r - f_e}{1 + f_e} \quad (16)$$

missä r on kaavan 15 mukaan laskettu reaalikorko
 f_e on energian hinnan inflaatio

Näitä laskettuja reaalikorkoja r ja r_e voidaan käyttää kustannusfunktiossa valittuna laskentakorkona i:n tilalla. (Sirén 2015b, s. 19–21 ja 26–28.)

5.2 Tutkimuksen ilmanvaihtojärjestelmän investointi- ja elinkaarilaskelmat

5.2.1 Investointikustannukset

Työssä tutkitaan kahden kohdefunktion, ilmanvaihtojärjestelmän investointikustannusten ja vuosittaisen lämmitysenergiankulutuksen, muutoksia erilaisilla lämmöntalteenotto- ja ilmanvaihdon ohjausvaihtoehdoilla. Optimoinnin päätösmuuttujat ja niille mahdolliset arvot on esitelty kappaleessa 4.4. Investointikustannuksiin huomioidaan tässä työssä ainoastaan ne kustannukset, jotka muuttuvat päätösmuuttujien arvojen muuttuessa. Tästä syystä työssä ei huomioida esimerkiksi huuvarijärjestelmän hintaa, vaan ainoastaan huuvarijärjestelmän sulkupeltien ja Halton M.A.R.V.E.L. -järjestelmän tuoma lisähinta asennuksineen. Ilmanvaihtokoneiden asennuskustannuksia tai kanavistojen hintoja ei huomioida, vaan näiden oletetaan olevan kaikissa ratkaisuvaihtoehdoissa melko samat.

Lämmöntalteenottoratkaisuiden vertailussa (taulukko 9) tulo- ja poistoilmakoneiden valmistaja on Koja, ja koneiden malli on Future. Ensimmäinen vertailtava vaihtoehto on tulo- ja poistoilmakone ilman lämmöntalteenottoa. Toisena vaihtoehtona on samanlainen koneyhdistelmä, mutta varustettuna Kojan tarjoamalla lämmöntalteenottoratkaisulla. Koulun valmistuskeittiössä ja liikenneasemankeittiössä tämä on KOJA Netto, joka on älykäs nestekiertoineen lämmöntalteenottokokonaisuus. Koja Netto optimoi jatkuvasti liuosvirtaa, mistä johtuen lämmöntalteenoton hyötysuhteen taataan olevan tasaisempi kaikkina vuodenaikoina. (Koja 2017b.) Koulun lämmityskeittiössä tämä vaihtoehto on ristivirtalämmönsiirrin. Kojan tuotevalikoimassa ei tällä hetkellä ole vastavirtalämmönsiirtimiä, sillä niiden taloudellista kannattavuutta ja käytännöllisyyttä tutkitaan parhailaan. Ristivirtasiirtimen investointikustannuksiin kuuluvat lohkosulatuspellistö ja sulatusautomaattikka. (Hauta-aho 2017.)

Kolme viimeisintä LTO-vaihtoehtoa sisältää Kojan tuloilmakoneen ja Retermia Oy:n valmistaman neulaputki-lämmöntalteenottokokonaisuuden sekä huippuimurin. Neulalämmöntalteenottoa on esitelty kappaleessa 2.3.7. Tämän tyyppisistä ratkaisuksista vertailaan 3-rivisiä, 5-rivisiä ja 6-rivisiä neulalämmönsiirtimiä, joilla on toisistaan eroavat lämpötilahyötysuhteet. LTO-huippuimuri mahdollistaa lyhyet kanavoinnit suoraan keittiöstä vesikatolle, mistä johtuen painehäviöt ja äänitasot on mahdollista pitää alhaisina. Ratkaisun eduiksi voidaan mainita myös puhdistuksen helpottuminen, paloturvallisuus-

den parantuminen sekä asennustöiden helpottuminen. Lisäksi teknisen tilan tarve pienenee, eikä poistoilmakoneelle tarvita erillistä palo-osastoitua tilaa. (Castrén 2017.) Näiden tekijöiden vaikutukset elinkaarikustannuksiin riippuvat suuresti tapauksesta, eikä niitä ei huomioida tämän työn laskelmissa.

Investointilaskelmissa käytetyt hinnat muuttuvailmavirta-järjestelmille (taulukko 10) ovat tarvittavat lisäkustannukset vakioilmavirtaiselle huuvarijärjestelmälle. Hinnat eivät siis sisällä huuvia tai kanavointeja. Hintoihin kuuluu myös tuloilmapuolen sulkupellit ja ilmavirtasäätimet, mutta ei puhaltimen taajuusmuuttajaa. Tämä sisältyy LTO-vaihtoehtoissa kunkin ilmanvaihtokoneen hintaan.

Vaihtoehto b käsittää ilmavirtojen porrastetun ohjauksen ja huuvariryhmäkohtaisen auki/kiinni -säädön. Tällöin ilmavirtoja ohjataan esimerkiksi ajastetusti sulkupellein, ja huuvariryhmät ovat auki mitoitusilmavirralla tai kokonaan suljettuina. Koulun valmistuskeittiössä ja liikenneasemankeittiössä samat sulkupellit ohjaavat useampia huuvia eli huuvariryhmiä. Koulun valmistuskeittiössä neljää huuva ohjaa kaksi peltiä. Huuvariryhmät muodostuvat astianpesu- ja ruuanvalmistusosastoista. Liikenneaseman keittiön 7 huuva on jaettu kolmeen ryhmään: astianpesu, lounas- ja alá carte -valmistus sekä burger ja bake-off paisto.

Vaihtoehdossa c ilmanvaihdon ohjaus toteutetaan huuvaakohtaisesti ja tarpeenmukaisesti Halton M.A.R.V.E.L. -järjestelmällä. Halton M.A.R.V.E.L. -järjestelmän toimintaa on esitelty kappaleessa 2.3.8. Liikenneaseman keittiössä Halton M.A.R.V.E.L. -järjestelmän hintaan kuuluu UV-suodatuslaitteisto. Valmistaja suosittelee tätä lisäksi M.A.R.V.E.L. -järjestelmiin sellaisissa keittiöissä, joissa poistoilma voi olla rasvaista. UV-suodatus parantaa tällaisissa tapauksissa selvästi tarpeenmukaisen ilmanvaihdon ohjauksen toimintavarmuutta ja paloturvallisuutta sekä vähentää puhdistuksen tarvetta. (Kaistinen 2017.) Koulun valmistus- ja lämmityskeittiössä poistoilma ei sisällä juuriakaan rasvaa, mistä johtuen näiden keittiöiden kohdalla tarkasteltava ratkaisu ei sisällä UV-suodatusta.

Ratkaisuvaihtoehtojen alkuinvestointikustannukset on esitetty taulukoissa 9 ja 10. Investointikustannukset kullekin järjestelmälle on määritetty laitevalmistajilta pyydettyjen hinta-arvioiden perusteella. Kaikki hinnat sisältävät 24 % arvonlisäveron.

Taulukko 9. Lämmöntalteenottovaihtoehtojen investointikustannukset euroina.

	IV-kone / tuloilmakone (Koja)	Neula LTO + huippuimuri (Retermia)	Kokonais- kustannus
Keittiö 1. Koulun valmistuskeittiö (3,8 m³/s)			
1) IV-kone, ei LTO:a	14880		14880
2) IV-kone, glyk.LTO lamellipatterilla	37200		37200
3) Tuloilmakone, LTO-huippuimuri, 3- rivinen neula-LTO	8930	39930	48860
4) Tuloilmakone, LTO-huippuimuri, 5- rivinen neula-LTO	8930	59400	68330
5) Tuloilmakone, LTO-huippuimuri, 6- rivinen neula-LTO	8930	63490	72420
Keittiö 2. Koulun lämmityskeittiö (1 m³/s)			
1) IV-kone, ei-LTO:a	8680		8680
2) IV-kone, ristivirta-LTO	19840		19840
3) Tuloilmakone, LTO-huippuimuri, 3- rivinen neula-LTO	4960	16600	21560
4) Tuloilmakone, LTO-huippuimuri, 5- rivinen neula-LTO	4960	22690	27650
5) Tuloilmakone, LTO-huippuimuri, 6- rivinen neula-LTO	4960	23560	28520
Keittiö 3. Liikenneaseman keittiö (3,8 m³/s)			
1) IV-kone, ei LTO:a	14880		14880
2) IV-kone, glyk.LTO lamellipatterilla	37200		37200
3) Tuloilmakone, LTO-huippuimuri, 3- rivinen neula-LTO	8930	39930	48860
4) Tuloilmakone, LTO-huippuimuri, 5- rivinen neula-LTO	8930	59400	68330
5) Tuloilmakone, LTO-huippuimuri, 6- rivinen neula-LTO	8930	63490	72420

Taulukko 10. Ilmanvaihdon ohjausvaihtoehtojen investointikustannukset euroina.

Keittiö 1. Koulun valmistuskeittiö (3,8 m³/s)	
A) VIV-järjestelmä	0
B) MIV-järjestelmä, ajastetusti porrastetut ilmavirrat ja huuvarymäkohtaiset sulkupellit	3600
C) MIV-järjestelmä, tarpeenmukainen ilmanvaihto (Halton M.A.R.V.E.L.)	23400
Keittiö 2. Koulun lämmityskeittiö (1 m³/s)	
A) VIV-järjestelmä	0
B) MIV-järjestelmä, ajastetusti porrastetut ilmavirrat ja huuvarymäkohtaiset sulkupellit	3000
C) MIV-järjestelmä, tarpeenmukainen ilmanvaihto (Halton M.A.R.V.E.L.)	11600
Keittiö 3. Liikenneaseman keittiö (3,8 m³/s)	
A) VIV-järjestelmä	0
B) MIV-järjestelmä, ajastetusti porrastetut ilmavirrat ja huuvarymäkohtaiset sulkupellit	4000
C) MIV-järjestelmä, tarpeenmukainen ilmanvaihto (Halton M.A.R.V.E.L.)	25100

5.2.2 Huoltokustannukset

Investointilaskelmissa huomioidaan ilmastointijärjestelmän hankinta- ja asennuskustannuksien lisäksi järjestelmän huolto- ja puhdistuskustannukset. Laskelmissa huomioidaan huoltokustannuksien osalta ainoastaan Halton M.A.R.V.E.L. -järjestelmästä ja lämmöntalteenottolaitteistoista aiheutuvat lisäkustannukset tavanomaisiin huoltoihin. Lisäksi liikenneaseman keittiössä huomioidaan vuosittaiset nuohouskustannukset, jotka ovat pienemmät niissä järjestelmissä, jotka on varustettu UV-suodatuksella.

Halton M.A.R.V.E.L. -järjestelmän vaatiman vuosihoillon lisäkustannuksena käytetään valmistajan antamaa arviota. Vuosihoitojen lisäksi valmistaja arvioi M.A.R.V.E.L.-järjestelmän vaativan 25 vuoden tarkastelujakson aikana nykyarvossa korkeintaan

12500 euron lisäkustannuksen, jolla katetaan erilaisten ohjauskomponenttien ja peltien moottoreiden vaihto, IR-tutkien päivitys uudempiin versioihin sekä ohjelmistopäivitykset. (Kaistinen 2017.)

Neulalämmöntalteenottolaitteisto huolletaan kerran vuodessa. Nämä vuosittain suoritettavat huoltotoimenpiteet koostuvat arviolta kahden tunnin imuroinnista sekä viiden tunnin korkeapainepesusta. Tämän lisäksi kuluu noin tunti ilmaukseen ja neulapinnan tarkistamiseen sekä vesi-glykoli-liuoksen näytteenottoon. Huoltotoimenpiteisiin tarvitaan 2 litraa SP130-pesuainetta ja 1 000–1 200 litraa vettä. Sähköenergiaa kuluu noin 10 kWh. (Ylänen 2014.) Näiden tietojen perusteella vuosihoillon hinta on noin 500 euroa. Laskelmissa kuitenkin huomioidaan se, että neulalämmönsiirtimet toimivat myös karkeasuodattimina, eikä näitä välttämättä tarvita erikseen. Karkeasuodattimien vuosittaisen vaihtokustannuksien on arvioitu olevan muissa LTO-vaihtoehtoissa samaa luokkaa, kuin neula-LTO:n huoltokustannuksien. Tästä syystä neula-LTO:n huoltokustannuksina käytetään työssä 0 euroa.

Kojan levylämmönsiirtimet tulee huoltaa 2 kertaa vuodessa. Tällöin tarkistetaan lämmönsiirtopinnat sekä muutoin järjestelmän toimivuus ja puhtaus. Lämmönsiirtimen puhdistus voidaan tehdä kevyesti harjaamalla, paineilmalla, pölynimurilla tai vedellä ja laimealla pesuaineliuoksella. Lisäksi lauhdeveden poistojärjestelmä tulee tarkistaa ja puhdistaa tarvittaessa. (Koja 2017a.) Tutkimuksessa ristivirta-LTO:n vuosittaisina huoltokustannuksina käytetään 400 euroa.

Kojan nestekiertoinen LTO-laitteisto huolletaan kerran vuodessa. Tällöin tarkistetaan, että patterien liitännät sekä lämmönsiirtopinnat ovat ehjät ja puhtaat. Patterien puhdistus voidaan tehdä kevyesti harjaamalla, paineilmalla, pölynimurilla tai vedellä ja laimealla pesuaineliuoksella. Lisäksi jäätymissuojan termostaatin toiminta tarkastetaan sekä lauhdeveden poistojärjestelmä tarkistetaan ja puhdistetaan tarvittaessa. Patterit ilmataan vuosihoillon yhteydessä sekä uudelleen 2-4 viikon lämmityskäytön jälkeen uudelleen, jotta LTO:n energiatehokkuus olisi mahdollisimman korkea. (Koja 2017a.) Nestekiertoisen LTO-järjestelmän vuosihoitokustannuksina käytetään koulun lämmityskeittiössä 300 euroa ja liikenneaseman keittiössä 400 euroa.

Nuohouskustannukset huomioidaan investointikustannuksissa liikenneaseman keittiöissä, jossa tutkitaan Halton M.A.R.V.E.L. -järjestelmään kuuluvan UV-suodatuksen hyötyjä. Nuohoukselle on saatu karkea hinta-arvio nuohoojalta. Nuohous suoritetaan vuosittain ja sen hinnaksi on arvioitu 6000 euroa. Toimiva UV-suodatus vähentää kuitenkin selvästi rasvan kertymistä kanavistoihin ja pienentää vuosittaisia nuohouskustannuksia. Halton M.A.R.V.E.L. -järjestelmän vuosittaisina nuohouskustannuksina käytetään 4000 euroa. (Kuitunen 2017.)

Taulukkoon 11 on koottu eri järjestelmävaihtoehtoista aiheutuvat lisäkustannukset vuosihoiltoihin tutkimuksen esimerkkikeittiöille.

Taulukko 11. Laskelmissa käytetyt huoltokustannukset esimerkkikeittiöille (€/vuosi).

	LTO	Neula-LTO	Halton M.A.R.V.E.L.	Nuohous
Keittiö 1. Koulun valmistuskeittiö (3,8 m³/s)	300	0	500	
Keittiö 2. Koulun lämmityskeittiö (1 m³/s)	400	0	500	
Keittiö 3. Liikenneaseman keittiö (3,8 m³/s)	400	0	1000	6000/4000

5.2.3 Laskentakorot ja diskonttaustekijät

Tutkimuksessa kaikki kustannukset siirretään nykyhetkeen. Investointien nimelliskorkona käytetään 4 %:a. Laskelmissa ei huomioida inflaation vaikutusta, joten sen arvoksi on asetettu 0 %. Reaalikorkona käytetään siis nimelliskorkoa 4 %. Sähkö- ja lämpöenergian hinnan eskalaationa käytetään 2 %:a. Energiamuotojen hintakehitystä on erittäin vaikea arvioida, joten eskalaatiot pyritään pitämään mahdollisimman neutraaleina, suosimatta yhtä energiamuotoa. Tällöin myös kaavalla 16 laskettu eskalaation huomioiva reaalikorko saa arvon 2,0 %.

Tarkasteluajanjaksona käytetään tutkimuksessa 25 vuotta. Tämä on arvioitu LTO-ratkaisujen tekniseksi käyttöiäksi. Tällä tavoin teknisen käyttöiän perusteella valittu mahdollisimman pitkä tarkasteluajanjakso antaa realistisimmat tulokset laskelmille, sillä laskelmissa ei huomioida investointien jäännösarvoja. Yleisesti käytetty menetelmä tarkasteluajanjakson valintaan on valita arvo, jonka suuruus on 1/laskentakorko. (Nisula 2017.)

Huoltokustannuksille sekä energiakustannuksille kaavan 12 mukaan lasketut diskonttaustekijät ovat 15,25 ja 19,61. Laskentakorot ja diskonttaustekijät on esitetty kootusti taulukossa 12.

Taulukko 12. Laskelmissa käytetyt laskentakorot ja diskonttaustekijät.

Laskentakorot ja diskonttaustekijät	
Investointien nimelliskorko	4,0 %
Yleinen inflaatio	0,0 %
Laskettu reaalikorko	4,0 %
Energian hinnan eskalaatio	2,0 %
Eskalaation huomioiva reaalikorko	2,0 %
Tarkasteluajanjakso	25
Huoltokustannusten diskonttaustekijä	15,25
Energiakustannusten diskonttaustekijä	19,61

5.2.4 Energian hinnat

Sähkön ja kaukolämmön hintoina käytetään Lahti Energian hinnastoissaan ilmoittamia arvoja. Sähkön hintana on käytetty Yrityssähkön hintaa ja tähän sisältyy sähköenergian hinnan lisäksi siirtomaksu sekä sähkövero. (Lahti Energia 2017b). Kaukolämmön hintana käytetään vuoden 2017 kevät- ja syyskauden hintaa, johon sisältyy arvonlisävero 24 % (Lahti Energia 2017a). Kaukolämmön perusmaksua ei huomioida laskelmissa, sillä

tarkastelussa on mukana vain osa rakennuksen lämpöenergiankulutuksesta. Perusmaksun määrä perustuu koko rakennuksen lämpöenergiankulutukseen, joten sen suuruutta ei pystytä tässä työssä arvioimaan. Laskelmissa käytetyt hinnat sähkölle ja kaukolämmölle on esitetty taulukossa 13.

Taulukko 13. Laskelmissa käytetyt hinnat sähkölle ja kaukolämmölle.

Energian hinnat	(€/MWh)
Sähkö (energia+siirto+sähkövero)	101,90
Kaukolämpö (energia)	63,05

6 Keittiöiden ilmanvaihtojärjestelmän energiasimulointi

6.1 Menetelmä

Tutkimuksessa ostoenergiakustannukset muodostuvat ilmanvaihtojärjestelmän sähköenergian sekä tuloilman lämmitysenergian kulutuksesta. Keittiöiden vuosittaiset ostoenergiatarpeet määritetään työssä mallinnuksen ja energiasimuloinnin avulla. Mallinnus- ja simulointityökaluna käytetään IDA Indoor Climate and Energy -ohjelmiston versiota 4.7.1. Laskelmissa ei huomioida tilalämmityksen vaikutusta kustannuksiin, vaikka ilmapirtojen muuttuminen vaikuttaa jonkin verran myös tilojen lämmitystarpeeseen.

IDA ICE -ohjelmiston avulla voidaan mallintaa tarkasti koko rakennus tai sen osa. IDA ICE soveltuu dynaamiseen monivyöhykemallinnukseen ja simuloinnilla voidaan tutkia rakennuksen tai sen osan lämpötasetta sekä energiankulutusta. Ohjelmalla voidaan suorittaa valitun mittaisia simulointijaksoja valitulla säädatalla. Ohjelma ottaa huomioon rakennuksen suuntauksen sekä auringon sijainnin ja liikkeet.

Työssä mallinnetaan kukin keittiö yhtenä tilana eli vyöhykkeenä. Keittiöiden geometriat, sisäiset lämpökuormat ja ilmanvaihtojärjestelmät mallinnetaan, mutta esimerkiksi seinien sekä ylä- ja alapohjan rakenteita ei huomioida. Keittiöiden oletetaan sijaitsevan rakennuksissa niin, etteivät ne ole ulkoseiniä vasten. Tällöin esimerkiksi auringon suora säteily ja rakennuksen suuntaus eivät vaikuta simulointituloksiin. Valmiille malleille suoritetaan energiasimulointi, jonka tuloksena saadaan raportti vyöhykkeen energiankulutuksesta ja lämpötaseesta vuoden ajanjaksolta. Säädatana simuloinnissa käytetään Helsinki-Vantaan vuoden 2012 referenssi-säädataa. Sisäilmaston tavoitearvoina käytetään valitun rakennustyyppin mukaisia oletusarvoja.

6.2 Lämpökuormat

Kunkin keittiön keittiölaitteista aiheutuvat tuntuvat lämpökuormat aikatauluineen sekä keskimääräinen kosteuskuorma on esitetty kappaleessa 3. VDI 2052 -standardin mukaan konvektiivisen lämpökuorman osuus on puolet tuntuvasta lämpökuormasta. Toinen puoli lämpökuormasta siirtyy siis säteilynä ympäröiviin pintoihin. Todellisuudessa konvektiivisen lämpökuorman osuus riippuu keittiölaitteesta. Työssä lämpökuormat mallinnetaan niin, että konvektiivisen lämpökuorman osuus siirtyy kokonaisuudessaan huuvien kautta ilmastointikanavaan ja toinen puoli tuntuvasta lämpökuormasta jää lämpösäteilynä lämmittämään huoneiden pintoja ja tätä kautta myös huonetilaa. Tällöin huuvan sieppausaste on 100 %, vaikka todellisuudessa tämä arvo on ainakin jonkin verran pienempi.

Myös keittiöiden käyttöajat ja henkilömäärät on esitetty kappaleessa 3. Työntekijöiden aktiivisuutena käytetään arvoa 1,6 met ja vaatetuksen lämmöneristävyysnä 0,6 clo. Valaistuksen lämpökuormana käytetään simulointiohjelman oletusarvoa. IDA-malleihin syötetyt arvot henkilö- ja valaistuskuormien osalta on esitetty taulukossa 14.

Taulukko 14. Mallinnuksessa käytetyt arvot henkilö- ja valaistuskuormille.

Keittiö1. Koulun valmistuskeittiö (3,8m³/s)	
Henkilökuorma	6 henkilöä
-aikataulu	koulupäivät, klo 6-15
-vaatetus	0,6 clo
-aktiiviteettitaso	1,6 met
Valaistuskuorma	190 W
-aikataulu	koulupäivät, klo 6-15
Keittiö 2. Koulun lämmityskeittiö (1m³/s)	
Henkilökuorma	3 henkilöä
-aikataulu	koulupäivät, klo 7-15
-vaatetus	0,6 clo
-aktiiviteettitaso	1,6 met
Valaistuskuorma	80 W
-aikataulu	koulupäivät, klo 7-15
Keittiö 3. Liikenneaseman keittiö (3,8m³/s)	
Henkilökuorma	1-5 henkilöä
-aikataulu	aina
-vaatetus	0,6 clo
-aktiiviteettitaso	1,6 met
Valaistuskuorma	200 W
-aikataulu	aina

6.3 Ilmanvaihtojärjestelmän mallinnus

Optimoinnin ratkaisuvaihtoehtojen ostoenergiatarpeiden vertailu toteutetaan muuttamalla IDA-malleihin tulo- ja poistoilmavirtoja sekä ilmanvaihtokoneen muita ominaisuuksia. Työssä tutkitaan kolmea ilmanvaihdon ohjaustapaa ja viittä lämmöntalteenottoratkaisua. Tällöin kullekin keittiölle mallinnetaan 15 erilaista ilmanvaihtokokonaisuutta.

Ilmanvaihdon ohjaustapa määritetään malleihin ilmanvaihtokoneen puhaltimille sekä järjestelmätyypille asetetun aikataulun avulla. Vakioilmavirtajärjestelmässä (vaihtoehto a) ilmanvaihtokoneet toimivat keittiön käyttöaikana mitoitusilmavirralla. Muuttuvilmavirtajärjestelmissä (vaihtoehdot b ja c) huuvien ilmavirroille on laadittu aikataulu koulujen keittiöissä puolen tunnin ja liikenneaseman keittiössä tunnin tarkkuudella. Ilmavirratt huuville on määritetty kullakin ajanhetkellä keittiön käyttöprofiilin ja ilmanvaihdon ohjaustavan mukaan. Vaihtoehdossa b huuvat toimivat ryhmäkohtaisesti joko mitoitusilmavirralla tai ovat kokonaan pois päältä. Vaihtoehdossa c huuvien mitoitusilmavirratt on kerrottu aina tilanteeseen sopivalla käyttöasteella (0-100 %). Huuville sopivat käyttöasteet eri keittiötyypeille ja käyttötilanteille on saatu valmistajalta (Kaistinen 2017). Myös ilmavirratt mallinnetaan vyöhykkeittäin, joten keittiöiden kaikki ilmavirratt on laskettu kullakin ajanhetkellä yhteen. Yleisilmanvaihto on päällä kaikissa keittiöissä niiden käyttöaikana.

Taulukoissa 15–17 on esitetty malleihin syötetyt aikataulut keittiöiden ilmavirroille eri ilmanvaihdon ohjausvaihtoehtoisissa. Koulujen keittiöissä ilmanvaihtokoneet ovat suljet-

tuina taulukoissa esitettyjen aikojen ulkopuolella, viikonloppuisin sekä kesäkuukausien ajan. Liikenneaseman keittiössä ilmavirrat on mallinnettu taulukon mukaisesti vuoden jokaisena päivänä. Tulo- ja poistoilmavirtoja ohjataan kaikissa ratkaisuvaihtoehdoissa samanaikaisesti, joten ne mallinnetaan keskenään saman suuruisina.

Taulukko 15. Keittiö 1. Koulun valmistuskeittiö: ilmavirrat eri ilmanvaihdon ohjausvaihtoehdoissa.

Aika	a) VIV-järjestelmä (m ³ /s)	b) MIV-järjestelmä, porrastetut ilmavirrat, huuvaryhmäkohtaiset sulkupellit (m ³ /s)	c) MIV-järjestelmä, tarpeenmukainen ilmanvaihto, Halton M.A.R.V.E.L. (m ³ /s)
6-6:30	3,8	2,9	0,65
6:30-7	3,8	2,9	2,21
7-7:30	3,8	2,9	2,99
7:30-8	3,8	2,9	2,99
8-8:30	3,8	2,9	2,99
8:30-9	3,8	2,9	3,07
9-9:30	3,8	2,9	3,07
9:30-10	3,8	2,9	3,27
10-10:30	3,8	3,8	3,27
10:30-11	3,8	3,8	2,30
11-11:30	3,8	3,8	2,30
11:30-12	3,8	3,8	2,30
12-12:30	3,8	3,8	2,30
12:30-13	3,8	3,8	1,97
13-13:30	3,8	1,2	0,85
13:30-14	3,8	1,2	0,85
14-14:30	3,8	1,2	0,65
14:30-15	3,8	1,2	0,65
15-15:30	3,8	0,3	0,30
15:30-16	3,8	0,3	0,30

Taulukko 16. Keittiö 2. Koulun lämmityskeitä: ilmapirrat eri ilmanvaihdon ohjausvaihtoehdoissa.

Aika	a) VIV-järjestelmä (m ³ /s)	b) MIV-järjestelmä, porrastetut ilmapirrat, huuvaryhmäkohtaiset sulkupellit (m ³ /s)	c) MIV-järjestelmä, tarpeenmukainen ilmanvaihto, Halton M.A.R.V.E.L. (m ³ /s)
7-7:30	1	0,5	0,19
7:30-8	1	0,5	0,43
8-8:30	1	0,5	0,55
8:30-9	1	0,5	0,55
9-9:30	1	0,5	0,55
9:30-10	1	0,5	0,55
10-10:30	1	1,0	0,75
10:30-11	1	1,0	1,00
11-11:30	1	1,0	1,00
11:30-12	1	1,0	0,88
12-12:30	1	1,0	0,64
12:30-13	1	1,0	0,64
13-13:30	1	0,6	0,39
13:30-14	1	0,6	0,39
14-14:30	1	0,6	0,19
14:30-15	1	0,6	0,19
15-15:30	1	0,1	0,10
15:30-16	1	0,1	0,10

Taulukko 17. Keittiö 3. Liikenneaseman keittiö: ilmavirrat eri ilmanvaihdon ohjausvaihtoehtoissa.

Aika	a) VIV-järjestelmä (m ³ /s)	b) MIV-järjestelmä, porrastetut ilmavirrat, huuvaryhmäkohtaiset sulkupellit (m ³ /s)	c) MIV-järjestelmä, tarpeenmukainen ilmanvaihto, Halton M.A.R.V.E.L. (m ³ /s)
0-1	3,8	2,2	0,90
1-2	3,8	2,2	0,90
2-3	3,8	2,2	0,90
3-4	3,8	2,3	0,90
4-5	3,8	2,3	0,93
5-6	3,8	3,0	1,42
6-7	3,8	3,8	1,71
7-8	3,8	3,8	1,63
8-9	3,8	3,7	1,42
9-10	3,8	3,7	1,77
10-11	3,8	3,7	1,93
11-12	3,8	3,7	2,04
12-13	3,8	3,7	2,04
13-14	3,8	3,7	1,82
14-15	3,8	3,8	2,43
15-16	3,8	3,1	2,31
16-17	3,8	3,1	2,25
17-18	3,8	3,1	2,22
18-19	3,8	3,1	2,22
19-20	3,8	3,0	2,22
20-21	3,8	3,0	2,22
21-22	3,8	3,0	0,90
22-23	3,8	2,2	0,90
23-24	3,8	2,2	0,90

Huuvaryhmäkohtaisesti säädettävässä muuttuvailmavirtajärjestelmässä huuvien ilmavirta on näiden mitoitusilmavirrasta keskimäärin koulun valmistuskeittiössä 65 %, koulun lämmityskeittiössä 60 % ja liikenneaseman keittiössä 78 %. Tarpeenmukaisella ohjauksella (Halton M.A.R.V.E.L. -järjestelmällä) vastaavat luvut ovat 53 %, 51 % ja 36 %. Halton on suorittanut mittauksia käytössä olevien keittiöiden huuvien käyttöasteista. Myös heidän mittaustensa mukaan vuorokauden ympäri toimivissa keittiöissä voitaisiin M.A.R.V.E.L. -järjestelmällä vähentää huuvien ilmamääriä 64 %. (Kaistinen 2017.)

Lämmöntalteenottovaihtoehtoja vertaillaan ilmanvaihtokoneen ominaisuuksia muuttamalla. Simuloinneissa huomioidaan LTO-laitteiston lämpötilahyötysuhde, laitteiston aiheuttamat ylimääräiset painehäviöt tulo- ja poistoilmapuolelle sekä nestekiertoisissa järjestelmissä kiertopumpun kuluttama sähköenergia. Lisäksi simuloinneissa huomioidaan laitevalmistajien ilmoittamat hyötysuhteet tulo- ja poistoilmapuhaltimille. Näiden vaikutus vuositasen ostoenergiankulutuksessa on kuitenkin melko pieni, sillä hyötysuhteet kaikissa järjestelmissä ovat lähellä toisiaan. IDA-malleihin syötettävät lämmöntal-

teenotto-ratkaisuja koskevat arvot on esitetty taulukossa 18. Tuloilman sisäänpuhalluslämpötila on kaikissa tapauksissa 16 °C.

Taulukko 18. Ilmanvaihtojärjestelmän mallinnuksessa LTO-vaihtoehtoja koskevat arvot.

	Tuloilman lämpötila- suhde (%)	SFP _{int} (kW/(m ³ /s))	Tuloilma- puhaltimen hyötysuhde	Poistoilma- puhaltimen hyötysuhde
Keittiö 1. Koulun valmistuskeittiö (3,8m³/s)				
1) IV-kone, ei LTO:a	-	0,271	0,56	0,54
2) IV-kone, LTO lamellipatterilla	68	0,854	0,60	0,59
3) 3-rivinen neula-LTO, LTO-huippuimuri	50	0,381	0,56	0,55
4) 5-rivinen neula-LTO, LTO-huippuimuri	63	0,420	0,56	0,55
5) 6-rivinen neula-LTO, LTO-huippuimuri	68	0,471	0,56	0,55
Keittiö 2. Koulun lämmityskeittiö (1m³/s)				
1) IV-kone, ei LTO:a	-	0,107	0,56	0,55
2) IV-kone, ristivirta-LTO	81	0,655	0,58	0,57
3) 3-rivinen neula-LTO, LTO-huippuimuri	50	0,219	0,56	0,55
4) 5-rivinen neula-LTO, LTO-huippuimuri	63	0,259	0,56	0,55
5) 6-rivinen neula-LTO, LTO-huippuimuri	68	0,309	0,56	0,55
Keittiö 3. Liikenneaseman keittiö (3,8m³/s)				
1) IV-kone, ei LTO:a	-	0,271	0,56	0,54
2) IV-kone, LTO lamellipatterilla	68	0,854	0,60	0,59
3) 3-rivinen neula-LTO, LTO-huippuimuri	50	0,381	0,56	0,55
4) 5-rivinen neula-LTO, LTO-huippuimuri	63	0,420	0,56	0,55
5) 6-rivinen neula-LTO, LTO-huippuimuri	68	0,471	0,56	0,55

SFP_{int}-luku merkitsee ilmanvaihtokomponenttien sisäistä ominaissähkötehoa. IDA-malleihin tämä jaetaan kahteen osaan vastaamaan tulo- ja poistoilmapuhaltimien ominaissähkötehoa. Puhaltimien SFP-luvussa huomioidaan LTO-laitteistojen vertailun kannalta oleelliset tekijät: lämmöntalteenoton aiheuttama painehäviö ilmapuolelle, puhaltimien hyötysuhteet ja nestekiertoisissa järjestelmissä nestepuolen painehäviö, liuoksen massavirta sekä liuoksen tiheys, joista saadaan kiertopumpun kuluttama sähköenergia. Kiertopumpun hyötysuhteena on käytetty 100 prosenttia, sillä energian vuosikulutuksen kannalta pumpun todellisuudessa korkealla hyötysuhteella ei ole juurikaan merkitystä. Halton M.A.R.V.E.L. -järjestelmän osalta UV-lamppujen ja peltimoottorien sähkönkulutusta ei simuloinneissa huomioida, sillä tämä ei ole valmistajan mukaan elinkaarikustannuksia tarkastellessa merkittävä tekijä. Tarkemmin lämmöntalteenottoratkaisuja koskevat ilmanvaihtojärjestelmän tekniset ominaisuudet on esitetty liitteessä 2.

7 Ammattikeittiöiden kustannusoptimaaliset ilmanvaihtoratkaisut

7.1 Optimoinnin tulokset

7.1.1 Tulosten määrittely

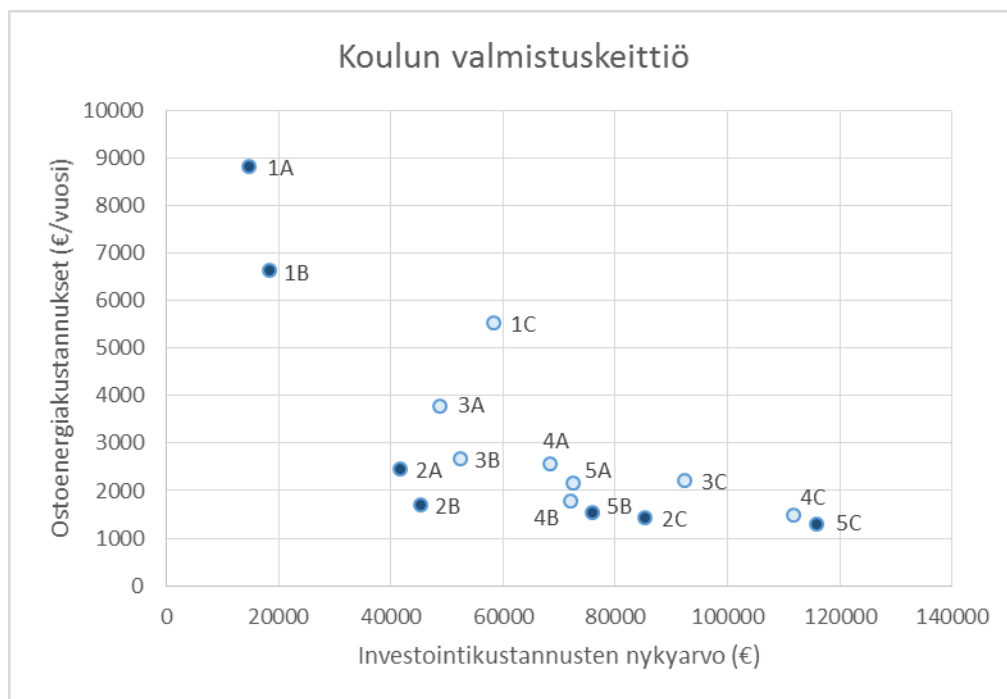
Tässä kappaleessa on esitetty optimoinnin tulokset kullekin esimerkkikeittiölle erikseen. Energiasimuloinnin tuloksena saatiin kullekin optimoinnin ratkaisuvaihtoehdolle ilmanvaihtojärjestelmän vuosittain kuluttama sähköenergia sekä tuloilman lämmittämiseen tarvittava lämpöenergia. Näiden tulosten ja kappaleessa 5.2.4 esitettyjen ostoenergian hintojen perusteella määritettiin kullekin ratkaisuvaihtoehdolle vuosittaiset ostoenergiakustannukset. Tämä oli ensimmäinen optimoinnin kahdesta kohdefunktiosta. Elinkaari-kustannuksia tarkastellessa vuosittaiset ostoenergiakustannukset on kerrottu energiakustannusten diskonttaustekijällä (kappale 5.2.3).

Optimoinnin toinen kohdefunktio oli ilmanvaihtojärjestelmän investointikustannukset. Laskelmissa kaikki investointikustannukset diskontattiin nykyhetkeen, ja tarkasteluajanjaksona käytettiin 25 vuotta. Investointikustannuksissa huomioitiin investointi tarkasteluajanjakson alussa, vuosittaiset huoltokustannukset sekä Halton M.A.R.V.E.L. -järjestelmässä tarkasteluajanjakson aikana vuosihuoltojen lisäksi vaadittavat korjauskustannukset. LTO-järjestelmien tekniseksi käyttöiäksi arvioitiin 25 vuotta, joten näiden järjestelmien ei oletettu vaativan tarkasteluajanjakson aikana mitään toimenpiteitä vuosihuoltojen lisäksi. Vuosittaiset huoltokustannukset kerrottiin huoltokustannusten diskonttaustekijällä (kappale 5.2.3). Halton M.A.R.V.E.L. -järjestelmän elinkaaren aikaisen korjaustoimenpiteiden kustannusarvio saatiin valmistajalta nykyarvoa vastaavana.

Tuloksia tarkastellessa tulee huomioida se, että investointikustannuksien nykyarvo ei kata koko ilmanvaihtojärjestelmän hintaa, vaan ainoastaan erotukset vaihtoehtojen välillä ovat vertailussa merkitseviä. Simulointien tuloksena saadut ostoenergiankulutukset ja yksityiskohtaisempi taulukko elinkaarilaskelmista on esitetty liitteessä 3.

7.1.2 Keittiö 1. Koulun valmistuskeittiö

Tutkimuksen optimointiongelman ratkaisujoukko koulun valmistuskeittiölle on esitetty kuvassa 10. Tummemmat pisteet esittävät kuvassa pareto-optimaalisia ratkaisuja. Samat ratkaisut on esitetty myös taulukossa 19. Taulukkoon on ostoenergiakustannuksien ja investointikustannusten lisäksi laskettu jokaiselle ratkaisuvaihtoehdolle nykyarvomennelmällä elinkaarikustannukset. Taulukossa on korostettu pareto-optimaaliset ratkaisut ja elinkaarikustannuksiltaan edullisin ratkaisu.



Kuva 10. Optimoinnin ratkaisujoukko koulun valmistuskeittiölle.

Taulukko 19. Optimoinnin ratkaisut sekä elinkaarikustannusten nykyarvot koulun valmistuskeittiölle.

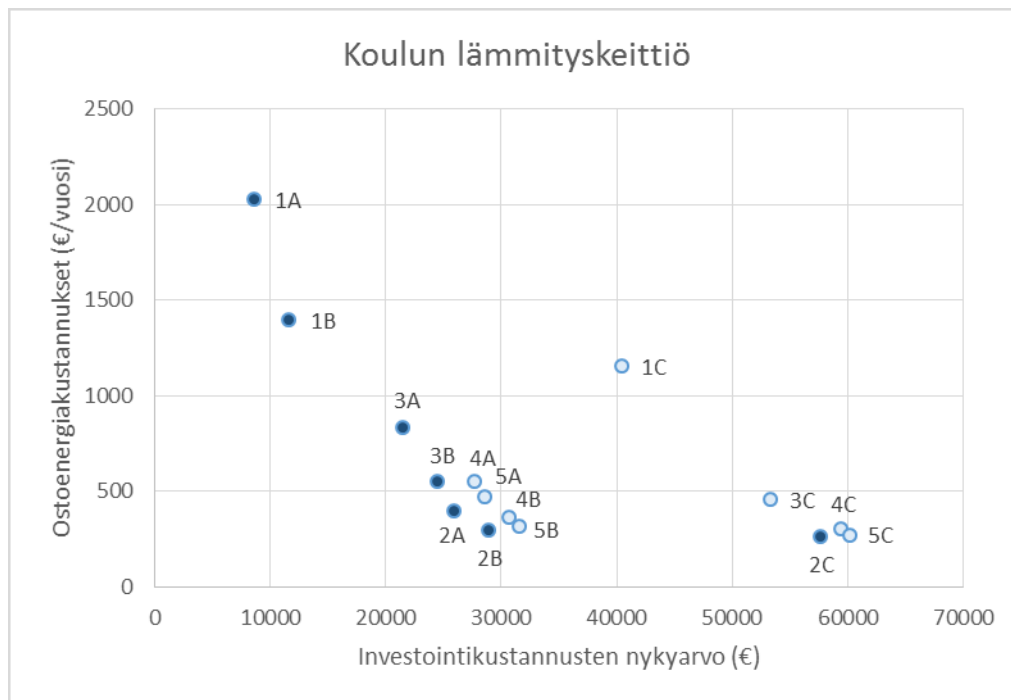
Ratkaisuvaihtoehto	Ostoenergia- kustannukset (€/vuosi)	Investointi- kustannusten nykyarvo (€)	Elinkaari- kustannusten nykyarvo (€)
1A) Ei LTO:a + VIV-järjestelmä	8800	14880	187471
1B) Ei LTO:a + MIV-järjestelmä, porrastetut ilmajärrat	6612	18480	148160
1C) Ei LTO:a + MIV-järjestelmä, Halton M.A.R.V.E.L.	5521	58403	166688
2A) Glyk. LTO lamellipatterilla + VIV-järjestelmä	2451	41774	89844
2B) Glyk. LTO lamellipatterilla + MIV-järjestelmä, porrastetut ilmajärrat	1686	45374	78451
2C) Glyk. LTO lamellipatterilla + MIV-järjestelmä, Halton M.A.R.V.E.L.	1409	85298	112926
3A) 3-rivinen neula-LTO + VIV-järjestelmä	3768	48860	122755
3B) 3-rivinen neula-LTO + MIV-järjestelmä, porrastetut ilmajärrat	2672	52460	104870
3C) 3-rivinen neula-LTO + MIV-järjestelmä, Halton M.A.R.V.E.L.	2205	92383	135636
4A) 5-rivinen neula-LTO + VIV-järjestelmä	2566	68330	118666
4B) 5-rivinen neula-LTO + MIV-järjestelmä, porrastetut ilmajärrat	1784	71930	106930
4C) 5-rivinen neula-LTO + MIV-järjestelmä, Halton M.A.R.V.E.L.	1483	111853	140947
5A) 6-rivinen neula-LTO + VIV-järjestelmä	2169	72420	114961
5B) 6-rivinen neula-LTO + MIV-järjestelmä, porrastetut ilmajärrat	1514	76020	105712
5C) 6-rivinen neula-LTO + MIV-järjestelmä, Halton M.A.R.V.E.L.	1287	115943	141186

Koulun valmistuskeittiön kohdalla investointikustannuksiltaan edullisimmat vaihtoehdot ovat 1A ja 1B, ratkaisut joihin ei kuulu lämmöntalteenottoa tai ilmanvaihdon tarpeenmukaista ohjausta Halton M.A.R.V.E.L. -järjestelmällä. Investointikustannuksiltaan kalleimpia ovat taas ne ratkaisuvaihtoehdot, joihin kuuluu Halton M.A.R.V.E.L. -järjestelmä. Vuosittaiset ostoenergiakustannukset ovat suurimmat niissä ratkaisuvaihtoehdoissa, joihin ei kuulu lämmöntalteenottoa. Ostoenergiakustannuksiltaan edullisin vaihtoehto 5C on samalla investointikustannuksiltaan kallein.

Elinkaarikustannuksia tarkastellessa voidaan huomata, että ratkaisut, joihin ei kuulu lämmöntalteenottoa, eivät ole tässä tapauksessa kannattavia. Myöskään ilmanvaihdon tarpeenmukaista ohjausta ei voida pitää kannattavana koulun valmistuskeittiössä näiden tulosten perusteella. Kuvaajan ja elinkaarilaskelmien tuloksien perusteella tutkimuksen reunaehtojen valossa optimaalisin ratkaisu koulun valmistuskeittiölle on ratkaisuvaihtoehto 2B, eli ilmanvaihtokokonaisuus johon kuuluu ilmanvaihtokonevalmistajan (Kojan) oma glykoli-LTO ja muuttuvailmavirtajärjestelmä porrastetuilla ilmavirroilla ja huuvaryhmäkohtaisilla sulkupelleillä.

7.1.3 Keittiö 2. Koulun lämmityskeittiö

Tutkimuksen optimointiongelman ratkaisujoukko koulun lämmityskeittiölle on esitetty kuvassa 11. Pareto-optimaaliset ratkaisut on esitetty kuvassa tummemmilla pisteillä. Samat ratkaisut on esitetty myös taulukossa 20. Taulukkoon on ostoenergiakustannuksien ja investointikustannusten lisäksi laskettu jokaiselle ratkaisuvaihtoehdolle nykyarvomenetelmällä elinkaarikustannukset. Taulukossa on korostettu pareto-optimaaliset ratkaisut ja elinkaarikustannuksiltaan edullisin ratkaisu.



Kuva 11. Optimoinnin ratkaisujoukko koulun lämmityskeittiölle.

Taulukko 20. Optimoinnin ratkaisut sekä elinkaarikustannusten nykyarvot koulun lämmityskeittiölle.

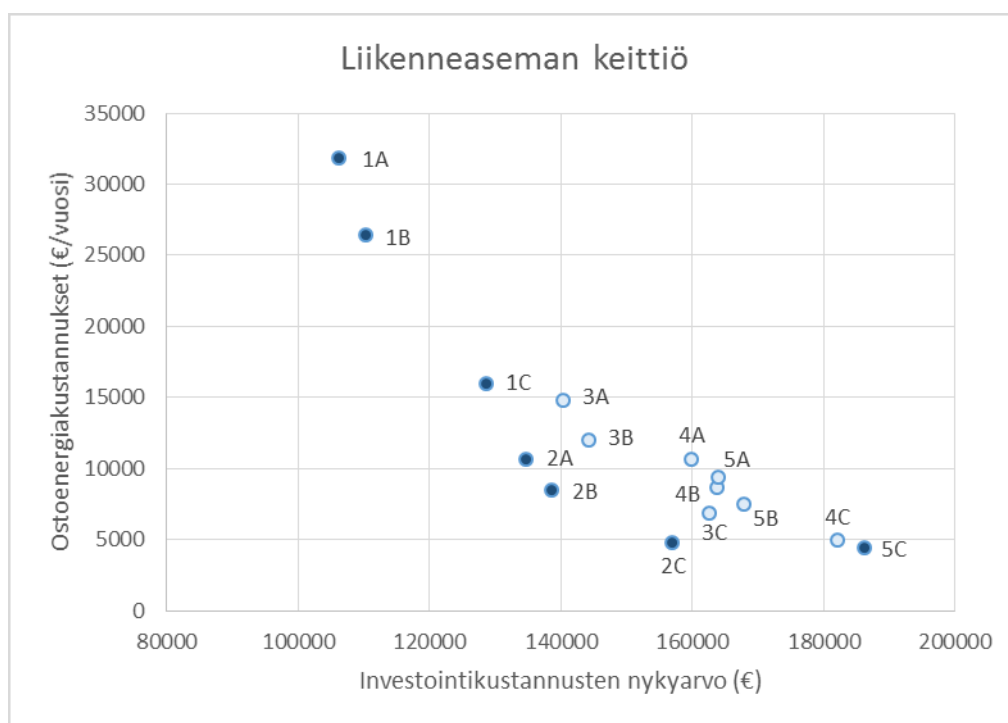
Ratkaisuvaihtoehto	Ostoenergia- kustannukset (€/vuosi)	Investointi- kustannusten nykyarvo (€)	Elinkaari- kustannusten nykyarvo (€)
1A) Ei LTO:a + VIV-järjestelmä	2027	8680	48441
1B) Ei LTO:a + MIV-järjestelmä, porrastetut ilmajärrat	1392	11680	38986
1C) Ei LTO:a + MIV-järjestelmä, Halton M.A.R.V.E.L.	1155	40403	63061
2A) Ristivirta-LTO + VIV-järjestelmä	396	25939	33706
2B) Ristivirta-LTO + MIV-järjestelmä, porrastetut ilmajärrat	289	28939	34613
2C) Ristivirta-LTO + MIV-järjestelmä, Halton M.A.R.V.E.L.	258	57662	62717
3A) 3-rivinen neula-LTO + VIV-järjestelmä	827	21560	37780
3B) 3-rivinen neula-LTO + MIV-järjestelmä, porrastetut ilmajärrat	547	24560	35286
3C) 3-rivinen neula-LTO + MIV-järjestelmä, Halton M.A.R.V.E.L.	454	53283	62183
4A) 5-rivinen neula-LTO + VIV-järjestelmä	551	27650	38451
4B) 5-rivinen neula-LTO + MIV-järjestelmä, porrastetut ilmajärrat	362	30650	37755
4C) 5-rivinen neula-LTO + MIV-järjestelmä, Halton M.A.R.V.E.L.	306	59373	65371
5A) 6-rivinen neula-LTO + VIV-järjestelmä	467	28520	37689
5B) 6-rivinen neula-LTO + MIV-järjestelmä, porrastetut ilmajärrat	314	31520	37670
5C) 6-rivinen neula-LTO + MIV-järjestelmä, Halton M.A.R.V.E.L.	270	60243	65548

Myös koulun lämmityskeittiön kohdalla investointikustannuksiltaan selkeästi edullisimmat vaihtoehdot ovat 1A ja 1B, ratkaisut joihin ei kuulu lämmöntalteenottoa tai ilmanvaihdon tarpeen-mukaista ohjausta Halton M.A.R.V.E.L. -järjestelmällä. Investointikustannuksiltaan kalleimpia ovat edelleen ne ratkaisuvaihtoehdot, joihin kuuluu Halton M.A.R.V.E.L. -järjestelmä. Vuosittaiset ostoenergiakustannukset ovat suurimmat niissä ratkaisuvaihtoehdoissa, joihin ei kuulu lämmöntalteenottoa.

Koulun lämmityskeittiön kohdalla investointikustannuksiltaan edullisemminkin järjestelmäkokonaisuuksilla saavutetaan alhaiset ostoenergiakustannukset. Huomataan siis, että näin pieniä ilmanvaihtomääriä vaativissa keittiössä kalliimmat investoinnit, kuten Halton M.A.R.V.E.L. -järjestelmä, eivät kannata. Kuitenkin lämmöntalteenottoa voidaan pitää tässäkin tapauksessa kannattavana, erityisesti vakioilmavirtajärjestelmissä. Elinkaarikustannuksiltaan edullisin ratkaisuvaihtoehto on 2A, eli vakioilmavirtajärjestelmä Kojan ristivirta-LTO:lla. Optimaalisina ratkaisuina voidaan pitää myös vaihtoehtoja 2B ja 3B, joihin kuuluu Kojan ristivirta-LTO tai Retermian 3-rivinen neula-LTO-kokonaisuus sekä muuttuvailmajärratjärjestelmä porrastetuilla ilmajärroilla ja huuvaryhmäkohtaisilla sulkupelleillä.

7.1.4 Keittiö 3. Liikenneaseman keittiö

Tutkimuksen optimointiongelman ratkaisujoukko liikenneaseman keittiölle on esitetty kuvassa 12. Pareto-optimaalisia ratkaisuja kuvataan tummemmilla pisteillä. Taulukossa 21 on esitetty samat ratkaisut. Taulukkoon on ostoenergiakustannuksien ja investointikustannusten lisäksi laskettu jokaiselle ratkaisuvaihtoehdolle nykyarvomenetelmällä elinkaarikustannukset. Taulukossa on korostettu pareto-optimaaliset ratkaisut ja elinkaarikustannuksiltaan edullisin ratkaisu.



Kuva 12. Optimoinnin ratkaisujoukko liikenneaseman keittiölle.

Taulukko 21. Optimoinnin ratkaisut sekä elinkaarikustannusten nykyarvot liikenneaseman keittiölle.

Ratkaisuvaihtoehto	Ostoenergia- kustannukset (€/vuosi)	Investointi- kustannusten nykyarvo (€)	Elinkaari- kustannusten nykyarvo (€)
1A) Ei LTO:a + VIV-järjestelmä	31779	106362	729670
1B) Ei LTO:a + MIV-järjestelmä, porrastetut ilmavirrat	26343	110362	627046
1C) Ei LTO:a + MIV-järjestelmä, Halton M.A.R.V.E.L.	15904	128715	440643
2A) Glyk. LTO lamellipatterilla + VIV-järjestelmä	10639	134781	343445
2B) Glyk. LTO lamellipatterilla + MIV-järjestelmä, porrastetut ilmavirrat	8430	138781	304118
2C) Glyk. LTO lamellipatterilla + MIV-järjestelmä, Halton M.A.R.V.E.L.	4752	157134	250346
3A) 3-rivinen neula-LTO + VIV-järjestelmä	14759	140342	429827
3B) 3-rivinen neula-LTO + MIV-järjestelmä, porrastetut ilmavirrat	12024	144342	380170
3C) 3-rivinen neula-LTO + MIV-järjestelmä, Halton M.A.R.V.E.L.	6903	162695	298085
4A) 5-rivinen neula-LTO + VIV-järjestelmä	10689	159812	369465
4B) 5-rivinen neula-LTO + MIV-järjestelmä, porrastetut ilmavirrat	8625	163812	332979
4C) 5-rivinen neula-LTO + MIV-järjestelmä, Halton M.A.R.V.E.L.	4968	182165	279597
5A) 6-rivinen neula-LTO + VIV-järjestelmä	9363	163902	347545
5B) 6-rivinen neula-LTO + MIV-järjestelmä, porrastetut ilmavirrat	7506	167902	315118
5C) 6-rivinen neula-LTO + MIV-järjestelmä, Halton M.A.R.V.E.L.	4394	186255	272444

Myös liikenneaseman keittiön kohdalla investointikustannuksiltaan edullisimpia ovat ratkaisut, joihin ei kuulu lämmöntalteenottoa tai ilmanvaihdon tarpeenmukaista ohjausta Halton M.A.R.V.E.L. -järjestelmällä (1A ja 1B). Nämä ovat myös vuosittaisilta ostoenergiakustannuksiltaan ja samalla elinkaarikustannuksiltaan selkeästi kalleimmat järjestelmät. Ostoenergiakustannuksiltaan edullisin vaihtoehto 5C on samalla investointikustannuksiltaan kallein.

Liikenneaseman keittiö poikkeaa koulujen keittiöistä suuresti sekä ruuanlaittoprosesseiltaan, että käyttöajoiltaan. Tutkimuksen kohteena oleva liikenneasema ja sen keittiö ovat auki ympäri vuorokauden vuoden jokaisena päivänä, joten myös ilmanvaihtojärjestelmän ostoenergiakustannukset ovat selvästi koulujen keittiöitä suuremmat. Lisäksi poistoilma saattaa olla rasvaista, jolloin UV-suodatuksella voidaan saavuttaa taloudellisia hyötyjä. Tässä tapauksessa kannattavat myös suuremmat energiatehokkuusinvestoinnit, koska ostoenergiakustannuksilla on suurempi vaikutus järjestelmän koko elinkaaren aikaisiin kustannuksiin.

Liikenneaseman keittiössä Halton M.A.R.V.E.L. -järjestelmällä varustetut ratkaisut ovat elinkaarikustannuksiltaan edullisimmat jokaisella LTO-vaihtoehdolla. Tässä tapauksessa M.A.R.V.E.L. -järjestelmään kuuluu myös poistoilman UV-suodatus. Elinkaarikustannuksiltaan edullisin ratkaisu on 2C, eli ilmanvaihtokokonaisuus johon kuuluu Kojan oma glykoli-LTO ja Halton M.A.R.V.E.L. -järjestelmä. Toisena optimaalisena ratkaisuna voidaan pitää vaihtoehtoa 5C, johon kuuluu Retermian 6-rivinen neula-LTO-kokonaisuus ja ilmanvaihdon tarpeenmukainen ohjaus Halton M.A.R.V.E.L. -järjestelmällä.

7.2 Herkkyystarkastelu: eskalaation vaikutus järjestelmän elinkaarikustannuksiin

Energiamuotojen hintakehitys voi poiketa huomattavasti inflaatiosta. Energian hinnan eskalaatio on suuri epävarmuustekijä energiainvestointien laskennassa, sillä tämän vaikutuksen arvioiminen on monimutkaista. Energian tulevaa hintakehitystä voi arvioida ainoastaan aiemman hintakehityksen perusteella, joten eskalaation tarkka ennustaminen on mahdotonta. Tästä syystä herkkyystarkasteluna tutkitaan työssä sähkön ja kaukolämmön hinnan eskalaation vaikutusta tutkittavien järjestelmävaihtoehtojen elinkaarikustannuksien nykyarvoon.

Eskalaatio vaikuttaa elinkaaren aikaisten ostoenergiakustannuksien nykyarvoon. Mitä suurempi on vuosittainen ostoenergian tarve suhteessa hankkeen investointikustannuksiin, sitä merkittävämpi tekijä eskalaatio nykyarvolaskelmissa on. Korkea eskalaatio korostaa ostoenergiatarpeen merkitystä nykyhetkeen diskontatuissa elinkaarilaskelmissa.

Eskalaation vaikutusta tutkitaan laskemalla elinkaarikustannusten nykyarvot eskalaation arvoilla 0-5 %. Taulukossa 22 on esitetty eskaloidut reaalikorot ja vuosittaisten energiakustannusten diskonttaustekijät eri eskalaation arvoilla. Laskelmissa reaalikorko on edelleen 4 % ja tarkasteluajanjakso 25 vuotta.

Taulukko 22. Eskaloidut reaalikorot ja vuosittaisten energiakustannusten diskonttaustekijät eri eskalaation arvoilla.

Energian hinnan eskalaatio	0,0 %	1,0 %	2,0 %	3,0 %	4,0 %	5,0 %
Eskalaation huomioiva reaalikorko	4,0 %	3,0 %	2,0 %	1,0 %	0,0 %	-1,0 %
Energiakustannusten diskonttaustekijä	15,62	17,47	19,61	22,10	25,00	28,38

Taulukoissa 23–25 on esitetty kunkin ratkaisuvaihtoehdon elinkaarikustannukset nykyarvoon diskontattuna taulukon 22 eskalaatioita käyttäen. Taulukoissa on korostettu

kolme elinkaarikustannuksiltaan edullisinta vaihtoehtoa kullekin esimerkkikeittiölle. Ratkaisuvaihtojen merkitykset on esitetty taulukoissa 19–21.

Taulukko 23. Elinkaarikustannuksien nykyarvot eri eskalaation arvoilla koulun valmistuskeittiössä.

Ratkaisu- vaihtoehto	Elinkaari- kustannusten nykyarvo (€), $f_e = 0 \%$	Elinkaari- kustannusten nykyarvo (€), $f_e = 1 \%$	Elinkaari- kustannusten nykyarvo (€), $f_e = 2 \%$	Elinkaari- kustannusten nykyarvo (€), $f_e = 3 \%$	Elinkaari- kustannusten nykyarvo (€), $f_e = 4 \%$	Elinkaari- kustannusten nykyarvo (€), $f_e = 5 \%$
1A	152347	168616	187471	209373	234895	264604
1B	121769	133993	148160	164617	183794	206116
1C	144651	154859	166688	180430	196443	215083
2A	80061	84592	89844	95944	103052	111327
2B	71719	74837	78451	82648	87540	93233
2C	107304	109908	112926	116432	120518	125274
3A	107717	114683	122755	132133	143060	155780
3B	94204	99145	104870	111521	119272	128293
3C	126834	130911	135636	141125	147521	154966
4A	108422	113167	118666	125054	132498	141162
4B	99807	103106	106930	111372	116547	122572
4C	135026	137768	140947	144639	148941	153949
5A	106304	110314	114961	120360	126651	133974
5B	99669	102468	105712	109480	113871	118981
5C	136049	138428	141186	144389	148122	152467

Taulukko 24. Elinkaarikustannuksien nykyarvot eri eskalaation arvoilla koulun lämmityskeittiössä.

Ratkaisu- vaihtoehto	Elinkaari- kustannusten nykyarvo (€), $f_e = 0 \%$	Elinkaari- kustannusten nykyarvo (€), $f_e = 1 \%$	Elinkaari- kustannusten nykyarvo (€), $f_e = 2 \%$	Elinkaari- kustannusten nykyarvo (€), $f_e = 3 \%$	Elinkaari- kustannusten nykyarvo (€), $f_e = 4 \%$	Elinkaari- kustannusten nykyarvo (€), $f_e = 5 \%$
1A	40349	44097	48441	53487	59367	66211
1B	33429	36003	38986	42451	46489	51189
1C	58450	60586	63061	65936	69287	73187
2A	32126	32858	33706	34692	35841	37178
2B	33458	33993	34613	35333	36173	37149
2C	61689	62165	62717	63359	64106	64977
3A	34479	36008	37780	39838	42237	45029
3B	33103	34114	35286	36647	38233	40079
3C	60372	61211	62183	63313	64629	66161
4A	36253	37271	38451	39821	41419	43278
4B	36309	36979	37755	38657	39708	40931
4C	64150	64716	65371	66132	67019	68051
5A	35823	36687	37689	38852	40208	41786
5B	36418	36998	37670	38450	39359	40418
5C	64469	64969	65548	66221	67006	67919

Taulukko 25. Elinkaarikustannuksien nykyarvot eri eskalaation arvoilla liikenneaseman keittiössä.

Ratkaisu- vaihtoehto	Elinkaari- kustannusten nykyarvo (€), $f_e = 0 \%$	Elinkaari- kustannusten nykyarvo (€), $f_e = 1 \%$	Elinkaari- kustannusten nykyarvo (€), $f_e = 2 \%$	Elinkaari- kustannusten nykyarvo (€), $f_e = 3 \%$	Elinkaari- kustannusten nykyarvo (€), $f_e = 4 \%$	Elinkaari- kustannusten nykyarvo (€), $f_e = 5 \%$
1A	602821	661576	729670	808768	900944	1008235
1B	521896	570600	627046	692613	769021	857959
1C	377163	406566	440643	480227	526356	580049
2A	300980	320649	343445	369925	400783	436700
2B	270470	286055	304118	325100	349550	378010
2C	231376	240163	250346	262175	275959	292004
3A	370914	398202	429827	466563	509373	559202
3B	332176	354406	380170	410096	444971	485564
3C	270532	283294	298085	315266	335288	358593
4A	326799	346562	369465	396071	427075	463163
4B	298552	314498	332979	354447	379464	408583
4C	259769	268953	279597	291961	306370	323141
5A	310172	327482	347545	370849	398007	429617
5B	285158	299035	315118	333800	355570	380911
5C	254904	263028	272444	283382	296127	310963

Tuloksista nähdään, että vertailuun valitut eskalaation arvot eivät vaikuta juurikaan siihen, mitkä ratkaisuvaihtoehdot ovat kullakin esimerkkikeittiöllä elinkaarikustannuksiltaan edullisimmat. Taulukoita tarkastellessa voidaan kuitenkin selkeästi huomata, että jokaisen esimerkkikeittiön kohdalla ostoenergiakustannuksiltaan edullisimmat järjestelmät nostavat kilpailukykyään silloin, kun eskalaation arvo nousee.

Myös herkkyyštarkastelussa tutkittiin kaukolämmölle ja sähkölle yhteistä eskalaatiota. Tutkimuksen lämmöntalteenottovaihtoehdoista neula-LTO-ratkaisuiden sähkönkulutus on pienistä lisäpainehäviöistä johtuen huomattavasti tavanomaisia lamellipattereilla varustettuja LTO-ratkaisuja pienemmät. Vaikka kokonaisenergiankulutus ilmanvaihtoratkaisulla olisi sama, vaikuttavat tämän tyyppiset erot elinkaarikustannuslaskelmiin silloin, kun sähkölle ja lämmölle käytetään eri eskalaation arvoja. Tällöin myös vertailu järjestelmien välillä saattaisi tuottaa erilaiset tulokset.

7.3 Johtopäätöksiä

Tutkimuksen tuloksien perusteella voidaan todeta, että lämmöntalteenotto taloudellisesti kannattavaa kaikissa tutkimuksen keittiötyypeissä. Käytännössä myös rakentamista koskevat määräykset velvoittavat lähes aina lämmöntalteenoton käyttöön keittiöilmanvaihdossa. Uudiskohteille tulee rakennusluvan saamiseksi tehdä lämpöhäviöiden tasauslaskelma, ja tätä laskelmaa varten vaaditaan koko rakennuksen ilmanvaihdolle tietty lämmöntalteenoton vuosihyötysuhde. Lämmöntalteenotto vaaditaan myös keittiön ilmanvaihtoon, sillä ammattikeittiöiden ilmamäärät kattavat usein merkittävän osan koko rakennuksen ilmamäärästä. Lämmöntalteenoton tehokkuus vaikuttaa myös rakennuksen E-lukuun. Rakennusten energiatehokkuusdirektiivin mukaan kaikkien uusien rakennusten pitää olla lähes nollaenergiarakennuksia vuoden 2021 alusta lähtien ja uusien julkisten rakennusten jo vuodesta 2019 lähtien.

Tutkimuksen tulokset osoittivat Halton M.A.R.V.E.L. -järjestelmän olevan taloudellisesti kannattavin ilmanvaihdon ohjausratkaisu liikenneaseman keittiössä. Tutkimus vahvisti jo aiemmat epäilyt siitä, että koulujen keittiöissä investointi tarpeenmukaiseen ilmanvaihdon ohjaukseen, eli M.A.R.V.E.L. -järjestelmään, ei välttämättä ole kannattava. Tuloksia voidaan perustella sillä, että koulujen keittiöt ovat käytössä melko pienen osan vuorokaudesta ja tänä aikana niiden käyttö on joka päivä hyvinkin samanlaista ja kuormitukset ennustettavissa. Tällöin ilmanvaihtokoneita voidaan pitää päällä päivittäin vain keittiöiden käytön ajan ja myös ajastetulla huuvaryhmäkohtaisella ilmavirtojen ohjauksella saavutetaan optimaaliset hyödyt.

Työn selkeinä johtopäätöksinä voidaan pitää lämmöntalteenoton kannattavuutta yleisesti tutkimuksen kohdekeittiöissä sekä tarpeenmukaisen ilmanvaihdon kannattavuutta vuorokauden ympäri palvelevassa liikenneaseman keittiössä. Eri valmistajien LTO-ratkaisuiden vertailun sen sijaan huomattiin sisältävän paljon epävarmuustekijöitä, ja kustannusfunktioiden ulkopuolelle jouduttiin rajaamaan useita tekijöitä. Tutkimuksessa käytettyjen rajausten vuoksi LTO-ratkaisuiden vertailun tuloksia ei voida yleistää käytännön suunnittelukohteisiin. Esimerkiksi kahdelta eri valmistajalta saadut kustannusarviot eivät välttämättä ole samanlaisin perustein annettu. Lisäksi joidenkin teknisten ratkaisuiden hinnat saattavat muuttua nopeastikin, mistä syystä kustannusarvioiden voimassaoloaika voi vaihdella.

Tutkimuksessa ei huomioitu lainkaan ilmanvaihtokoneiden ja -kanavistojen asennuksista aiheutuvia kustannuksia. Erityisesti poistoilmakoneen asennuspaikka on kuitenkin merkittävä tekijä ilmanvaihtojärjestelmien elinkaarikustannuksia tarkastellessa. Ammatikeittiöiden poistoilmakoneet on pääosin asennettava palo-osastoituun tilaan, mikä saattaa aiheuttaa merkittäviä ylimääräisiä kustannuksia. Retermian neula-LTO-ratkaisuissa poistoilmakoneena toimii katolle asennettava LTO-huippuimuri. Tämä on usein sekä paloturvallisuusvaatimuksista että huoltonäkökohdista johtuen taloudellisesti edullisin ratkaisu. Lisäksi katolla sijaitsevalle poistoilmakoneelle johtavat kanavoinnit ovat usein lyhemmät, jolloin sekä kanaviston asennuskustannukset että käytönaikaiset painehäviöt ovat pienemmät. Kanaviston pienemmät painehäviöt taas vähentävät ilmanvaihtojärjestelmän sähkönkulutusta. Näiden tekijöiden huomiointi simuloinneissa ja investointilaskelmissa vaikuttaa LTO-vaihtoehtojen vertailun tuloksiin merkittävästi.

Laskelmissa ei huomioitu myöskään lämmöntalteenottojärjestelmän likaantumisesta aiheutuvaa energiatehokkuuden heikkenemistä. Tutkimuksen esimerkkikeittiöistä varsinkin liikenneasemankeittiössä kanavistoon pääsee UV-suodatuksistakin huolimatta paljon rasvaa. Tämä pääosin höyryn muodossa oleva rasva tiivistyy rasvan kastepistettä viileämpiin LTO-poistopatterin lämmönsiirtopintoihin. Lisäksi siirtimille päätyy rasvaa pisaramuodossa, mikäli huuvien rasvanerotuksessa on jokin toimintahäiriö. Neulalämmönsiirtimien eduksi voidaan lukea sen helppo puhdistettavuus järjestelmän koko elinkaaren ajan. Lisäksi niiden lämmönsiirtoteho ei juuri heikkene tai niiden aiheuttama painehäviö ilmapuolelle ei nouse siirtimien rasvoittuessa huoltokertojen välillä. Mikäli lämmönsiirtopatterin painehäviö nousee jyrkästi patterin likaantuessa, pienenevät poistoilmamäärät huoltovälien aikana. Tällaiset patterityypit eivät sovellu keittiöilmanvaihdon lämmöntalteenottoon.

Edellä mainittujen tekijöiden lisäksi LTO-laitteistojen vertailun tuloksiin vaikuttavat käytetyt hinnat sähkölle ja lämmölle sekä näiden hintojen eskalaatiot. Sähkön ja lämmön hintakehitys on suuri epävarmuustekijä LTO-ratkaisuiden vertailussa, sillä ratkaisuvaihtoehtojen sähköenergian osuudet kokonaisenergiankulutuksesta poikkeavat toisis-

taan merkittävästi. Työn herkkyystarkastelussa tutkittiin ainoastaan sähkölle ja lämmölle yhteisen eskalaation vaikutusta vertailun tuloksiin. Todellisuudessa sähkön ja lämmön hinnat saattavat kuitenkin kehittyä toisistaan poikkeavalla tavalla, jolloin myös LTO-ratkaisuvaihtoehtojen vertailu tuottaa erilaiset tulokset.

8 Yhteenveto

Tämän diplomityön tavoitteena oli ammattikeittiön ilmanvaihtojärjestelmän energiatehokkuuden optimointi. Tutkimuksen tarkoituksena oli määrittää kustannusoptimaaliset ratkaisut lämmöntalteenoton ja tarpeenmukaisen ilmanvaihdon käytölle keittiöilmanvaihdossa. Tutkimusmenetelmänä käytettiin energiasimulointiin perustuvaa monitavoiteoptimointia.

Keittiön käyttöprofiili vaikuttaa lämmöntalteenotolla ja erityisesti tarpeenmukaisella ilmanvaihdolla ja saavutettavaan energiansäästöön ja tällä tavoin energiatehokkuusinvestointien kannattavuuteen. Keittiön käyttöprofiilin ennustaminen on kuitenkin usein hankalaa siinä vaiheessa, kun ilmanvaihtoa suunnitellaan. Tästä syystä työssä lähestyttiin tutkimusongelmaa jo käytössä olevien esimerkkikeittiöiden avulla. Tutkimuksen kohteeksi valittiin kolme erityyppistä keittiötä: koulun valmistuskeittiö, koulun lämmityskeittiö sekä liikenneaseman keittiö. Tutkimuksen tavoitteena oli määrittää näille kolmelle keittiölle elinkaarikustannuksiltaan, ja samalla energiatehokkuudeltaan, optimaalinen ilmanvaihtoratkaisu.

Elinkaarikustannuksien optimoinnissa huomioitiin ilmanvaihtojärjestelmän investointi- ja ostoenergiakustannukset, jotka olivat siis monitavoiteoptimoinnin minimoitavat kohdefunktiot. Päättömuuttujia oli optimoinnissa kaksi: lämmöntalteenoton toteutustapa ja ilmanvaihdon ohjaustapa. Lämmöntalteenottotapoja vertailtiin viittä ja ilmanvaihdon ohjaustapoja kolmea erilaista, jolloin päätösmuuttujista muodostui ilmanvaihtojärjestelmälle erilaisia ratkaisuvaihtoehtoja yhteensä 15 kappaletta. Tässä tapauksessa oli mahdollista tutkia optimoinnin jokaista ratkaisuvaihtoehtoa erikseen ja määrittää niille kohdefunktioiden arvot. Monitavoiteoptimoinnin lisäksi jokaiselle ratkaisulle laskettiin nykyarvomenetelmällä elinkaarikustannukset, ja vaihtoehtoja vertailtiin myös tämän laskennan perusteella.

Kullekin ratkaisuvaihtoehdolle määritettiin siis investointikustannukset sekä energiasimuloinnin avulla vuosittaiset ostoenergiakustannukset. Investointikustannuksiin laskettiin vertailun kannalta oleelliset ilmastointijärjestelmän hankinta- ja asennuskustannukset sekä järjestelmän huolto- ja puhdistuskustannukset. Energiankulutuksen simulointityökaluna käytettiin IDA Indoor Climate and Energy -ohjelmiston versiota 4.7.1. Työkalulla mallinnettiin kunkin keittiön geometriat sekä keittiölaitteiden ja käyttöprofiilien perusteella määritetyt sisäiset lämpökuormat aikatauluineen. Tämän lisäksi mallinnettiin ilmanvaihtojärjestelmä kutakin optimoinnin ratkaisuvaihtoehtoa vastaavasti. Ilmanvaihtojärjestelmän osalta mallinnettiin ilmavirrat aikatauluineen sekä lämmöntalteenottolaitteiston ominaisuudet. Ilmavirrat ja ilmanvaihdon aikataulu määritettiin malleihin sisäisten lämpökuormien ja ilmanvaihdon ohjaustavan perusteella. Tämän jälkeen kullekin ratkaisuvaihtoehdolle suoritettiin energiasimulointi, jonka tuloksena saatiin ilmanvaihdon vuosittainen sähköenergiankulutus ja tuloilman lämmitysenergiankulutus eri ratkaisuvaihtoehdoissa. Näiden tulosten perusteella määritettiin kullekin ratkaisuvaihtoehdolle vuosittaiset ostoenergiakustannukset.

Lämmöntalteenotto osoittautui taloudellisesti kannattavaksi tutkimuksen kaikissa esimerkkikeittiöissä. Työssä tutkittiin siis sitä, onko lämmöntalteenotto taloudellisesti kannattava ratkaisu esimerkkikeittiöissä, ja tämän lisäksi vertailtiin neljää erilaista lämmöntalteenottoratkaisua. Eri valmistajien LTO-ratkaisuiden vertailun kuitenkin huomattiin sisältävän paljon epävarmuustekijöitä, ja kustannusfunktioiden ulkopuolelle jouduttiin

rajaamaan useita tekijöitä. Elinkaarikustannuslaskelmien perusteella ilmanvaihtokonevalmistaja Kojan LTO-ratkaisut olivat edullisimmat kaikille keittiöille, mutta tutkimuksessa käytettyjen rajausten vuoksi tätä tulosta ei voida yleistää käytännön suunnittelukohteisiin. Tutkimuksessa ei huomioitu esimerkiksi ilmanvaihtokoneen asennuspaikan merkitystä investointi- ja huoltokustannuksiin tai lämmöntalteenottojärjestelmän likaantumisesta aiheutuvaa energiatehokkuuden mahdollista heikkenemistä. Näiden tekijöiden huomioiminen energiasimuloinneissa ja investointilaskelmissa nostaa useissa tapauksissa Retermian neula-LTO-ratkaisuiden kilpailukykyä vaihtoehtojen vertailussa. Selkeänä johtopäätöksenä voidaan kuitenkin pitää lämmöntalteenoton kannattavuutta yleisesti tutkimuksen kohdekeittiöissä.

Lämmöntalteenoton kannattavuuden lisäksi työssä tutkittiin sitä, onko ammattikeittiöiden ilmanvaihtoa kannattavaa ohjata tarpeenmukaisesti. Tarpeenmukaista ilmanvaihtoa verrattiin vakioilmavirtajärjestelmään sekä muuttuvailmavirtajärjestelmään, jossa ilmavirtoja ohjataan ajastetusti huuvaryhmäkohtaisesti sulkupellein. Sekä monitavoiteoptimoinnin, että elinkaarikustannuslaskelmien perusteella tarpeenmukaisen ilmanvaihdon, eli Halton M.A.R.V.E.L. -järjestelmän, osoitettiin olevan taloudellisesti kannattavin ilmanvaihdon ohjausratkaisu liikenne-aseman keittiössä. Koulujen keittiöissä optimaaliseksi ilmanvaihdon ohjausratkaisuksi osoittautui huuvaryhmäkohtaisilla sulkupelleillä säädettävä muuttuvailmavirtajärjestelmä. Vuorokauden ympäri avoinna olevassa liikenneaseman keittiössä ilmanvaihtomäärät ovat selvästi koulujen keittiöitä suuremmat, mistä syystä myös kalliimmat investoinnit energiatehokkuuteen osoittautuivat kannattaviksi. Koulujen keittiöt ovat käytössä vain osan vuorokaudesta, jona aikana niiden käyttö ja kuormitukset on joka päivä melko samanlaisia ja ennustettavissa. Tästä syystä myös ajastetulla huuvaryhmäkohtaisella ilmavirtojen ohjauksella saavutetaan optimaaliset hyödyt.

Lähdeluettelo

American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers. 2011. ASHRAE handbook: heating, ventilating, and air-conditioning applications. Atlanta, Ga.: ASHRAE cop. ISBN 978-1-936504-06-0 (painettu), ISBN 978-1-61344-664-5 (sähköinen).

Caldas, L. G. ja Norford, L. K. 2003. Genetic algorithms for optimization of building envelopes and the design and control of HVAC systems. Journal of Solar Energy Engineering. [Verkkolehti]. Vol. 125:3. S. 343-351. ISSN 0199-6231.

Castrén, M. 2017. Toimitusjohtaja. Retermia Oy. Paininpuuntie 17, 18100 Heinola. Sähköpostiviesti 24.4.2017.

Clark, J. 2009. Solving kitchen ventilation problems. ASHRAE Journal. [Verkkolehti]. Vol. 51:7. S. 20-24. ISSN 0001-2491.

Clark, J. 2012. Design Considerations for Commercial Kitchen Ventilation. ASHRAE Journal. [Verkkolehti]. Vol. 54:2. S. 54–62. ISSN 0001-2491.

Edilex. 2017. Rakentamismääräykset. [Viitattu 17.2.2017]. Saatavissa: <https://www.edilex.fi/rakentamismaaraykset>.

Fisher, D., Swierczyna, R. ja Karas, A. 2013. Future of DCV for commercial kitchens. ASHRAE Journal. [Verkkolehti]. Vol. 55:2. S. 48–54. ISSN 0001-2491.

Halton Oy. 2017. Halton – M.A.R.V.E.L. – Älykäs tarpeenmukainen ilmastointijärjestelmä ammattikeittiöihin. [Viitattu 2.3.2017]. Saatavissa: http://www.halton.com/dh/AQAzghIQISbMvdtHv65zq1JcmCccPcdl0UJmmpTfN5cSrsp7tnF_40ETaZ-M8ZFxm7n7kvXq0uZ0ZHBsqgf18YGTkPmliLTrTSbtf4l8Rw7XaYpwiw/Halton-FS-MARVEL-fi1403.pdf.

Hauta-aho, M. 2017. Myynti-insinööri. Koja Oy. Vanha Nurmijärventie 62, 01670 Vantaa. Sähköpostiviesti 4.5.2017.

Kaistinen, J. 2017. Sales Manager. Halton Oy. Esterinportti 2, 00240 Helsinki. Sähköpostiviesti 7.6.2017.

Koja 2017a. Future-ilmankäsittelykone. Käyttö ja huolto-ohje.

Koja. 2017b. Koja Netto. [Viitattu 30.5.2017]. Saatavissa: <http://www.koja.fi/koja-netto>.

Komission asetus (EU) N:o 1253/2014. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin 2009/125/EY täytäntöönpanosta ilmanvaihtokoneiden ekologisen suunnittelun vaatimusten osalta. Annettu 7.2.2014.

Kuitunen, P. 2017. Nuohoojamestari. Peten piippupalvelu Oy. Puhelinhaastattelu 28.6.2017.

Lahti Energia. 2017a. Kaukolämmön hinnat kuluttajille. [Viitattu 5.6.2017]. Saatavissa: <https://www.lahtienergia.fi/lammitys/50/50>.

Lahti Energia. 2017b. Valitse sinulle sopiva sähkötuote. [Viitattu 5.6.2017]. Saatavissa: <https://www.lahtienergia.fi/sahko>.

Livchak, A., Schrock, D. ja Sun, Z. 2005. The Effect of Supply Air Systems on Kitchen Thermal Environment. ASHRAE Transactions. [Verkkolehti]. Vol. 111:1. S. 748-754. ISSN 0001-2505.

Maankäyttö- ja rakennuslaki, 13 §. [Viitattu 17.2.2017]. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1999/19990132#a132-1999>.

Motiva Oy. 2016a. Ammattikeittiot. [Viitattu 9.2.2017]. Saatavissa: http://www.motiva.fi/julkinen_sektori/ammattikeittiot.

Motiva Oy. 2016b. Energiakatselmoijan käsikirja, osa II.

Ng, T.P., Hui, K.P., Tan, W.C. 1993. Respiratory symptoms and lung function effects of domestic exposure to tobacco smoke and cooking by gas in non-smoking women in Singapore. Journal of Epidemiology and Community Health. [Verkkolehti]. Vol. 454-458. S. 36-48. ISSN 1470-2738.

Nisula, M. 2017. Energia-asiantuntija. Granlund Consulting Oy. Malminkaari 21, 00700 Helsinki. Sähköpostiviesti 12.6..2017.

Rakennustieto Oy. 2000. Ammattikeittiöiden sisäilmaston suunnittelu, LVI 06-10304.

Rakennustieto Oy. 2014. Ravintolat ja kahvilat, RT 94-11164.

Reisbacka, A., Rytönen, A., Salminen, M. ja Kosonen, R. 2009. Energiatehokas ammattikeittiö -opas. Nurmijärvi. TTS tutkimuksen loppuraportti. [Viitattu 9.2.2017]. Saatavissa: http://www.motiva.fi/files/3041/TTS-tutkimuksen_loppuraportti_2009_Energiatehokas_ammattikeittio.pdf.

Retermia Oy. 2015. Suomalaisten laitevalmistajien tulkinta ekosuunnitteluasetuksesta. Retermia News, numero 1/2015. [Viitattu 27.6.2017]. Saatavissa: <http://www.retermia.fi/esitteet-ja-materiaalit/retermia-news/>.

Retermia Oy. 2016. Aito elinkaarivertailu tulee tarpeeseen. Retermia News, numero 1/2016. [Viitattu 26.4.2017]. Saatavissa: <http://www.retermia.fi/esitteet-ja-materiaalit/retermia-news/>.

Retermia Oy. 2017. Tuotteet. [Viitattu 25.4.2017]. Saatavissa: <http://www.retermia.fi/tuotteet/terminologia/>.

Sandberg, E. 2014. Ilmastointilaitoksen mitoitus. Helsinki: Talotekniikka-Julkaisut Oy. ISBN 978-952-99770-7-9.

Schrock, D., Sandusky, J. ja Livchak, A. 2012. Demand-Controlled Ventilation For Commercial Kitchens. ASHRAE Journal. [Verkkolehti]. Vol. 54:11. S. 36–48. ISSN 0001-2491.

Seow, A., Poh, W.-T., Teh, M., Eng, P., Wang, Y.-T., Tan, W.-C., Yu, M.C. ja Lee, H.-P. 2000. Cancer Epidemiology Biomarkers and Prevention. [Verkkolehti]. Vol. 9:11. S. 1215-1221. ISSN 055-9965.

Seppänen, O. 2004. Ilmastoinnin suunnittelu. Helsinki: Talotekniikka-Julkaisut Oy. ISBN 952-91-6896-9.

Seppänen, O., Railio, J. ja Strand, T. 2014. D2 uusintatarveselvitys. Suomen LVI-liitto, SuLVI ry. Loppuraportti 26.11.2014 [viitattu 17.2.2017]. Saatavissa: <http://www.sulvi.fi/wp-content/uploads/2015/02/D2-loppuraportti-marraskuu-26.pdf>.

Sirén, K. 2015a. Lyhyt johdatus rakennusten energiaoptimointiin. Aalto yliopisto. Espoo.

Sirén, K. 2015b. Rakennusten energiainvestointien kannattavuuden laskenta. Aalto yliopisto. Espoo.

Stogevičius, G. 2014. Assessment of indoor environment quality based on a field study in commercial kitchens. Diplomityö. Technical University on Denmark. Tanska.

Thiebaud, H.P., Knize, M.G., Kuzmicky, P.A., Hsieh, D.P. ja Felton, J.S. 1995. Airborne mutagens produced by frying beef, pork and a soy-based food. Food and Chemical Toxicology. [Verkkolehti]. Vol. 33:10. S. 821–828. ISSN 0278-6915.

Vainiotalo, S. ja Matveinen, K. 1993. Cooking fumes as a hygienic problem in the food and catering industries. American Industrial Hygiene Association Journal. [Verkkolehti]. Vol. 54:7. S. 376-382. ISSN 0002-8894.

Verein deutscher ingenieure. 2006. VDI 2052. Raumluftechnische Anlagen für Küchen (Ventilation equipment for kitchens).

Värpiö, T. 2017. Astianpesu Expertti. Aleksanterinkatu 26 A 6, 33100 Tampere. Sähköpostiviesti 9.5.2017.

Ylänen, V. 2014. Tuloilman passiivisen lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmän kannattavuuden tarkastelu. Opinnäytetyö. Mikkelin ammattikorkeakoulu. Mikkeli.

Ympäristöministeriö. 2012. D2 Suomen rakentamismääräyskokoelma, Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto. [Viitattu: 8.2.2017]. Saatavissa: https://www.edilex.fi/data/rakentamismaaraykset/d2_2012.pdf.

Ympäristöministeriö. 2013. Ekosuunnitteludirektiivi (2009/125/EU) ja energiamerkintädirektiivi (2010/30/EU). [Viitattu 16.3.2017]. Saatavissa: http://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Rakentamisen_ohjaus/Rakennustuotteiden_tuotehyvak_synta/Ekosuunnitteludirektiivi_ja_energiamerkintadirektiivi.

Liiteluettelo

Liite 1. Keittiöiden laitekohtaiset lämpö- ja kosteuskuormat.

Liite 2. Ilmanvaihtokoneelle mallinnetut arvot eri lämmöntalteenottovaihtoehtoissa.

Liite 3. Elinkaarilaskelmat taulukoituna

Liite 1. Keittiöiden laitekohtaiset lämpö- ja kosteuskuormat.

L1. 1. Keittiö 1. Koulun valmistuskeittiön laitekohtaiset lämpö- ja kosteuskuormat.

lkm	Laite	Sähköteho (kW)	Tuntuva lämpökuorma (W/kW)	Latentti lämpökuorma (W/kW)	Kosteuskuorma (g/(h kW))	Tuntuva lämpökuorma (kW)	Latentti lämpökuorma (kW)	Kosteuskuorma (kg/h)	Konvektiivinen lämpökuorma (kW)
Huuva 1, padat									
1	Keittiöpata	40	35	200	294	1.4	8.0	11.8	0.7
2	Keittiöpata	52.2	35	200	294	3.7	20.9	30.7	1.8
1	Induktioliesi	20	70	28	41	1.4	0.6	0.8	0.7
	YHTEENSÄ	112.2				6.5	29.4	43.3	3.2
Huuva 2, uunit									
1	Yhdistelmäuuni	34.5	120	180	265	4.1	6.2	9.1	2.1
2	Yhdistelmäuuni	49	120	180	265	11.8	17.6	26.0	5.9
1	Keittiöpata (dieetti)	20	35	200	294	0.7	4.0	5.9	0.4
	YHTEENSÄ	103.5				16.6	27.9	41.0	8.3
Huuva 3, astioiden pesu									
1	Astianpesukone, tunneli	31.8				7.0	3.2	4.7	3.5
	YHTEENSÄ	31.8				7.0	3.2	4.7	3.5
Huuva 4, patapesu									
1	Astianpesukone, pata	21				3.6	2.0	2.9	1.8
	YHTEENSÄ	21				3.6	2.0	2.9	1.8
	KAIKKI YHTEENSÄ	268.5				33.7	62.5	91.9	16.8

L1. 2. Keittiö 2. Koulun lämmityskeittiön laitekohtaiset lämpö- ja kosteuskuormat.

lkm	Laite	Sähköteho (kW)	Tuntuva lämpökuorma (W/kW)	Latentti lämpökuorma (W/kW)	Kosteuskuorma (g/(h kW))	Tuntuva lämpökuorma (kW)	Latentti lämpökuorma (kW)	Kosteuskuorma (kg/h)	Konvektiivinen lämpökuorma (kW)
Huuva 1, uunit									
1	Yhdistelmäuuni	19	120	180	265	2.3	3.4	5.0	1.1
1	Yhdistelmäuuni	21	120	180	265	2.5	3.8	5.6	1.3
	YHTEENSÄ	40				4.8	7.2	10.6	2.4
Huuva 2, astianpesu									
1	Astianpesukone	40				3.9	2.6	3.8	2.0
	YHTEENSÄ	40				3.9	2.6	3.8	2.0
	KAIKKI YHTEENSÄ	80				8.7	9.8	14.4	4.4

L1. 3. Keittiö 3. Liikenneaseman keittiön laitekohtaiset lämpö- ja kosteuskuormat.

lkm	Laite	Sähköteho (kW)	Tuntuva lämpökuorma (W/kW)	Latentti lämpökuorma (W/kW)	Kosteuskuorma (g/(h kW))	Tuntuva lämpökuorma (kW)	Latentti lämpökuorma (kW)	Kosteuskuorma (kg/h)	Konvektiivinen lämpökuorma (kW)
Huuva 1, astioiden pesu									
1	Astianpesukone, tunneli	39				7.4	3.3	4.9	3.7
	YHTEENSÄ	39				7.4	3.3	4.9	3.7
Huuva 2, patapesu									
1	Astianpesukone, pata	12.5				2.0	1.0	1.5	1.0
	YHTEENSÄ	12.5				2.0	1.0	1.5	1.0
Huuva 3, á la carte									
1	Pizzauuni	12.3	350	160	235	4.3	2.0	2.9	2.2
1	Paistotaso	12	330	400	588	4.0	4.8	7.1	2.0
2	Rasvakeitin	7.5	90	700	1030	1.4	10.5	15.5	0.7
1	Induktioliesi	7.5	70	28	41	0.5	0.2	0.3	0.3
1	Pakastevetolaatikko	0.6	700	-	-	0.4	-	-	0.2
1	Kylmävetolaatikosto	0.45	700	-	-	0.3	-	-	0.2
	YHTEENSÄ	40.35				10.9	17.5	25.7	5.4
Huuva 4, lounasvalmistus									
1	Keittiöpata	16	35	200	294	0.6	3.2	4.7	0.3
1	Induktioliesi	8	70	28	41	0.5	0.2	0.3	0.3
2	Yhdistelmäuuni	18	120	180	265	4.2	6.3	9.3	2.1
	YHTEENSÄ	41				5.3	9.7	14.3	2.6
Huuva 5, bake-off paisto									
1	Bake-off uuni	6.5	350	160	235	2.3	1.0	1.5	1.1
	YHTEENSÄ	6.5				2.3	1.0	1.5	1.1
Huuva 6, burger peruna-asema									
1	Automaattirasvakeitin	17.5	50	550	808	0.9	9.6	14.1	0.4
	YHTEENSÄ	17.5				0.9	9.6	14.1	0.4
Huuva 7, burger									
2	Puoliautomaattiparila	6.5	250	230	338	3.3	3.0	4.4	1.6
1	Pakasteallas	0.7	700	-	-	0.5	-	-	0.2
	YHTEENSÄ	7.2				3.7	3.0	4.4	1.9
	KAIKKI YHTEENSÄ	164				32.5	45.1	66.4	16.2

Liite 2. Ilmanvaihtokoneelle mallinnetut arvot eri lämmöntalteenottovaihtoehtoissa.

	Tuloilman lämpötila- suhde (%)	LTO:n aiheuttama painehäviö, tuloilma (Pa)	LTO:n aiheuttama painehäviö, poistoilma (Pa)	Nestepuolen painehäviö (kPa)	SFP_{int} (kW/(m ³ /s))	Tuloilma- puhaltimen hyötysuhde	Poistoilma- puhaltimen hyötysuhde	Liuoksen massavirta (kg/s)	Liuoksen tiheys (kg/m ³)
Keittiö 1. Koulun valmistuskeittiö (3,8m³/s)									
1) IV-kone, ei LTO:a	-	-	-	-	0,271	0,56	0,54	0	-
2) IV-kone, LTO lamellipatterilla	68	175	175	147	0,854	0,60	0,59	1,36	1200
3) 3-rivinen neula-LTO, LTO-huippuimuri	50	28	28	30	0,381	0,56	0,55	1,5	1062,4
4) 5-rivinen neula-LTO, LTO-huippuimuri	63	41	31	60	0,420	0,56	0,55	1,5	1062,4
5) 6-rivinen neula-LTO, LTO-huippuimuri	68	54	46	60	0,471	0,56	0,55	1,5	1062,4
Keittiö 2. Koulun lämmityskeittiö (1m³/s)									
1) IV-kone, ei LTO:a	-	-	-	-	0,107	0,56	0,55	-	-
2) IV-kone, ristivirta-LTO	81	174	143	-	0,655	0,58	0,57	-	-
3) 3-rivinen neula-LTO, LTO-huippuimuri	50	28	28	30	0,219	0,56	0,55	0,4	1062,4
4) 5-rivinen neula-LTO, LTO-huippuimuri	63	41	31	60	0,259	0,56	0,55	0,4	1062,4
5) 6-rivinen neula-LTO, LTO-huippuimuri	68	54	46	60	0,309	0,56	0,55	0,4	1062,4
Keittiö 3. Liikenneaseman keittiö (3,8m³/s)									
1) IV-kone, ei LTO:a	-	-	-	-	0,271	0,56	0,54	-	-
2) IV-kone, LTO lamellipatterilla	68	175	175	147	0,854	0,60	0,59	1,36	1200
3) 3-rivinen neula-LTO, LTO-huippuimuri	50	28	28	30	0,381	0,56	0,55	1,5	1062,4
4) 5-rivinen neula-LTO, LTO-huippuimuri	63	41	31	60	0,420	0,56	0,55	1,5	1062,4
5) 6-rivinen neula-LTO, LTO-huippuimuri	68	54	46	60	0,471	0,56	0,55	1,5	1062,4

Liite 3. Elinkaarilaskelmat taulukoituna.

	Sähkö- energian kulutus (kWh/vuosi)	Lämpö- energian kulutus (kWh/vuosi)	Ostoenergia- kustannukset (€/vuosi)	Investointi- alkuhetkellä (€)	Huolto- kustannukset (€/vuosi)	Korjaus- kustannukset tarkasteluajan- jaksolla (€)	Investointi- kustannusten nykyarvo (€)	Elinkaari- kustannusten nykyarvo (€)
Keittiö 1. Koulun valmistuskeittiö								
Ratkaisu- vaihtoehto								
1A	2665	135257	8800	14880	0		14880	187471
1B	1871	101841	6612	18480	0		18480	148160
1C	1501	85138	5521	38280	500	12500	58403	166688
2A	6766	27936	2451	37200	300		41774	89844
2B	4366	19691	1686	40800	300		45374	78451
2C	3252	17086	1409	60600	800	12500	85298	112926
3A	3382	54289	3768	48860	0		48860	122755
3B	2297	38669	2672	52460	0		52460	104870
3C	1793	32078	2205	72260	500	12500	92383	135636
4A	3640	34821	2566	68330	0		68330	118666
4B	2453	24338	1784	71930	0		71930	106930
4C	1902	20452	1483	91730	500	12500	111853	140947
5A	4000	27936	2169	72420	0		72420	114961
5B	2673	19690	1514	76020	0		76020	105712
5C	2058	17086	1287	95820	500	12500	115943	141186
Keittiö 2. Koulun lämmityskeittiö								
Ratkaisu- vaihtoehto								
1A	207	31818	2027	8680	0		8680	48441
1B	113	21898	1392	11680	0		11680	38986
1C	81	18191	1155	20280	500	12500	40403	63061
2A	1107	4492	396	19840	400		25939	33706
2B	595	3627	289	22840	400		28939	34613
2C	420	3409	258	31440	900	12500	57662	62717
3A	380	12502	827	21560	0		21560	37780
3B	205	8342	547	24560	0		24560	35286
3C	144	6964	454	33160	500	12500	53283	62183
4A	443	8018	551	27650	0		27650	38451
4B	238	5361	362	30650	0		30650	37755
4C	167	4580	306	39250	500	12500	59373	65371
5A	526	6564	467	28520	0		28520	37689
5B	282	4517	314	31520	0		31520	37670
5C	199	3968	270	40120	500	12500	60243	65548
Keittiö 3. Liikenneaseman keittiö								
Ratkaisu- vaihtoehto								
1A	10019	487841	31779	14880	6000		106362	729670
1B	7468	405743	26343	18880	6000		110362	627046
1C	3346	246831	15904	39980	5000	12500	128715	440643
2A	28677	122388	10639	37200	6400		134781	343445
2B	20950	99840	8430	41200	6400		138781	304118
2C	8526	61596	4752	62300	5400	12500	157134	250346
3A	13331	212545	14759	48860	6000		140342	429827
3B	9842	174794	12024	52860	6000		144342	380170
3C	4225	102654	6903	73960	5000	12500	162695	298085
4A	14520	146068	10689	68330	6000		159812	369465
4B	10700	119503	8625	72330	6000		163812	332979
4C	4552	71431	4968	93430	5000	12500	182165	279597
5A	16157	122389	9363	72420	6000		163902	347545
5B	11883	99840	7506	76420	6000		167902	315118
5C	5012	61596	4394	97520	5000	12500	186255	272444